

УДК 57.025+57.045+537.63

## БИОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОСЛАБЛЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

© 2022 г. Б. Ф. Щеголев<sup>а</sup>, С. В. Сурма<sup>а</sup>, В. Е. Стефанов<sup>б</sup>, М. Б. Павлова<sup>а,\*</sup>, Н. В. Ширяева<sup>а</sup>, Т. Г. Зачепило<sup>а</sup>, Н. Г. Лопатина<sup>а</sup>

<sup>а</sup> ФГБУН Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург, 199034 Россия

<sup>б</sup> ФГБУ ВПО Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

\*e-mail: pavlova@infran.ru

Поступила в редакцию 08.08.2021 г.

После доработки 20.08.2021 г.

Принята к публикации 10.09.2021 г.

В статье обобщены результаты собственных исследований воздействия ослабленного посредством экранирования магнитного поля Земли (ОМПЗ) на широкий спектр поведенческих, физиологических и молекулярно-клеточных характеристик у насекомых (дрозофила, медоносная пчела) и млекопитающих (крыса), а также приведены данные литературы о воздействии ОМПЗ на клеточные культуры грызунов и человека. Выявлен специфический для ОМПЗ тормозящий, усиливающий тормозную функцию нервной системы эффект воздействия. Характер влияния зависит от генетически детерминированных нейрофизиологических и биохимических характеристик биологического объекта.

**Ключевые слова:** геомагнитное поле, магнитное экранирование, магнитобиологические эффекты (МБЭ), стресс, кровь, гемодинамические показатели, обучение и память, ориентировочно-исследовательская активность, возбудимость, клеточные культуры, дрозофила, пчела, крысы

**DOI:** 10.31857/S0301179822010076

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных физических факторов, определяющих все элементы жизнедеятельности живых организмов на Земле, является магнитное поле Земли (МПЗ). Его изменения приводят к сбою в работе эндогенных механизмов, в том числе отсчитывающих время, управляющих деятельностью ЦНС, целого ряда внутриклеточных биохимических механизмов [7, 16, 19].

Высокая проникающая способность МПЗ в биологические ткани позволяет отнести его к внешним факторам прямого действия, способным вызывать структурные изменения на любом иерархическом уровне организации биологического объекта и тем самым оказывать воздействие на весь организм в целом [9, 11]. По степени чувствительности к влиянию магнитных полей (МП) первое место занимает нервная система, поскольку магнитные поля способны напрямую воздействовать на потенциал действия и проводимость нейронов [1, 3].

Вопрос о физических механизмах, лежащих в основе формирования и появления магнитобиологических эффектов (МБЭ), рассматривается в литературе достаточно давно. Например, в автореферате диссертации Бинге В.Н. [2] приводится достаточно подробное рассмотрение существующих на тот момент возможных теоретических обоснований формирования и проявления МБЭ

в биологических средах. В том числе, отмечается и возможность формирования дополнительного потенциала на поверхности клетки, помещенной в электрическое поле, вызываемое внешним магнитным полем.

При таком подходе к рассмотрению МБЭ и степени его проявления основными параметрами внешнего магнитного поля будут являться величина интенсивности (напряженности, индукции) МП и экспозиция [2].

В настоящее время существует ряд искусственно созданных человеком ситуаций (мест), где наблюдаются отклонения от естественного МПЗ. Многочисленные мощные источники (линии электропередачи, электрооборудование, радиопередатчики и т.д.) локально усиливают естественный магнитный фон. Тогда как в некоторых антропогенных системах естественный магнитный фон значительно снижен. Так, в условиях космических полетов МПЗ в значительной степени ослаблено. На высоте нахождения экипажей на орбитальных станциях магнитный фон снижен более чем на 3 порядка [13, 24]. Ранее считалось, что слабые статические магнитные поля безопасны для человека. В последние годы появляются данные, свидетельствующие о потенциальной опасности для организма воздействия таких полей, требующие, однако, подтверждения [18].

В связи с этим задачей настоящей статьи явилось обобщение результатов собственных исследований воздействия ослабленного магнитного поля Земли (ОМПЗ) и возникающих при этом слабых статических МП при физическом моделировании их параметров за счет экранирования на широкий спектр поведенческих, физиологических и молекулярно-клеточных характеристик у насекомых (дрозофила, медоносная пчела) и млекопитающих (крыса), а также на ряд клеточных культур грызунов и человека.

#### *Физическое моделирование ослабленного магнитного поля Земли путем экранирования*

Для физического моделирования ослабленного магнитного поля (ОМП) во всех обсуждаемых ниже работах использовались цилиндрические экранирующие камеры, изготовленные из немагнитного материала, покрытые сверху разным количеством слоев магнитомягкого экранирующего материала АМАГ 172 [12]. Все слои “намотаны” в одну сторону, с одного торца камера закрыта фиксированной заглушкой. Заглушка имеет экранирующее покрытие, идентичное покрытию камеры. Внутри камеры предусмотрена подставка из немагнитного материала, позволяющая устанавливать биологические объекты в центре по оси экранирующей камеры. Неоднородность величины индукции магнитного поля в центре камеры не превышала нескольких процентов, поэтому ОМП в месте расположения биологических объектов считалась в первом приближении однородной. Внутри этих экранирующих камер, в зависимости от количества слоев обмотки, достигается разная величина ослабления статического МП Земли (от 30 до 250 раз), кроме того используемый материал, по данным производителя, еще более эффективно экранирует от воздействия разного рода переменных МП, при этом существенное возрастание коэффициента экранирования наблюдается с МГц диапазона. Для определения величины индукции магнитного поля за пределами и внутри экранирующих камер были проведены измерения с использованием магнитометров Fluxmaster (StefanMayerInstruments, Dinslaken, Germany) (1 нТл–200 мкТл, с разрешением 1нТл) и НВ0302.1А (St. Petersburg, Russia) (0.1 мкТл–100 мкТл, с разрешением 0.1 мкТл). Величина индукции МП Земли в Санкт-Петербурге и Ленинградской области, где проводились эксперименты, составляет 48–50 мкТл. Во всех случаях для контроля использовались аналогичные камеры без покрытия.

Выбор времени экспозиций биологических объектов в камерах осуществлялся, основываясь на отработанной практике работы с ними: часы–сутки для клеточных культур, несколько суток–дней недели – для живых объектов. Выбор степени ослабления МПЗ зависел от поставленной задачи физического моделирования воздействия

ослабленного поля: в сотни раз – для анализа состояний биообъектов в космосе и в десятки раз – для биообъектов в земных условиях. Кроме того, размерные ограничения на экранирующие камеры накладывала необходимость их помещения в термостат или инкубатор.

#### *Воздействие ослабления МПЗ на поведение: ассоциативную деятельность и ориентировочно-исследовательскую активность*

Объектами исследования способности к обучению и формированию памяти в условиях ОМПЗ служили линии *Drosophila melanogaster* – Canton-S (CS) и мутантная линия *agn<sup>ts3</sup>*, несущая температуро-чувствительную (*ts*) мутацию по гену *limk*, который кодирует ключевой фермент ремоделирования актина LIMK1, и медоносная пчела *Apis mellifera carnica* Pollm (Биоколлекция Института физиологии им. И.П. Павлова РАН) [8, 9].

Для оценки способности к обучению и формированию памяти у дрозофилы использовали метод условно-рефлекторного подавления ухаживания (УРПУ) [9, 17], у медоносной пчелы – метод выработки условного рефлекса вытягивания хоботка на обонятельный раздражитель при однократном пищевом подкреплении [17]. Данные рефлексы основаны на безусловных обонятельных рефлексах и широко используются в экспериментах по ассоциативному обучению у дрозофилы и пчелы. У пчелы также фиксировали уровень пищевой мотивации и обонятельной чувствительности.

Во всех поведенческих экспериментах опытная группа животных подвергалась 12-часовому воздействию ОМП (внутри камеры пчелы и дрозофилы – 0.1 мкТл, крысы – 1.2 мкТл). В месте проведения эксперимента величина МП Земли составляла 40–45 мкТл. Для контроля-1 использовали камеру, имитирующую опытную – без покрытия. Размеры камеры соответствовали размерам изучаемых объектов. В качестве контроля-2 служили интактные животные, не подвергавшиеся воздействию. Период воздействия совпадал с темновой фазой циркадного ритма подопытных животных. Эксперименты начинали через 1 ч после прекращения воздействия ОМПЗ. В опытах на дрозофиле воздействию подвергали как особей на стадии имаго, так и личинок третьего возраста; в опытах на пчеле – рабочих особей в возрасте 10–30 сут.

Исследования, проведенные на насекомых – линии CS дрозофилы и медоносной пчеле – выявили значительное ухудшение способности удерживать в памяти – кратковременной, промежуточной и долговременной вырабатываемый у них условный рефлекс. 12-часовое пребывание в имитирующей камере не отразилось на когнитивной активности. Уровни пищевой мотивации и обонятельной чувствительности у пчел в условиях всех экспериментальных воздействий оставались

подобными таковым у интактных насекомых. После двенадцатичасового ослабления магнитного поля у пчелы ухудшалась и кратковременная (1 мин после обучения), и долговременная память (3 ч после обучения). У дрозофилы линии дикого типа Canton-S индекс обучения сразу после обучения не изменяется, тогда как через 3 ч значительно снижается. Вероятно, что длительное нахождение насекомых в условиях ОМПЗ приводит к нарушениям работы белков, участвующих в когнитивной (а не сенсорной и пищевой) деятельности, а именно – в процессах формирования долговременной памяти. В экспериментах, проведенных на пчелах, такое заключение следует из того, что сенсорная и пищевая возбудимость в контроле и опыте не различались. Возможно, что магниточувствительностью в ЦНС обладают некоторые белки-рецепторы, вовлеченные в формирование памяти, например, ионотропные рецепторы глутамата или ГАМК. Однако это предположение требует дальнейшей проверки.

Интересный факт был получен при изучении ассоциативной деятельности в условиях ОМПЗ мутантной линии дрозофилы *agn<sup>ts3</sup>*, самцы которой в норме не способны к обучению УРПУ. 12-часовое пребывание мутанта в условиях ОМП восстанавливало эту способность до нормального уровня линии CS. Предшествующие эксперименты [6] показали сходное воздействие на способность к обучению мутанта *agn<sup>ts3</sup>* такого стрессорного фактора, как повышение температуры, что позволило сделать заключение и о стрессорном характере влияния ОМПЗ, а также о его зависимости от индивидуальных нейрофизиологических характеристик изучаемого объекта. Последнее заключение нашло хорошее подтверждение при сравнительном изучении ориентировочно-исследовательской активности у линий крыс с высоким и низким порогами возбудимости нервной системы.

Параллельно с изучением характера влияния ОМПЗ на поведение (УРПУ) дрозофилы в работе Никитиной с соавторами [9] исследовали воздействие ОМПЗ на транскрипционную активность генов. При анализе интенсивности окрашивания ядер слюнных желез личинок дрозофилы линий CS и *agn<sup>ts3</sup>* с антителами к ацетилованному полизину 9/14 гистону H3 были выявлены как межлинейные различия, так и воздействие ОМПЗ на иммунореактивность клеток. Под действием ОМПЗ транскрипционная активность меняется разнонаправленно: у линии дикого типа CS интенсивность свечения возрастает, а у мутанта *agn<sup>ts3</sup>* незначительно уменьшается. Известно, что формирование долговременной памяти требует синтеза новых белков и изменения транскрипционной активности. Поэтому полученные факты об изменении транскрипционной активности генома могут указывать на изменение пула активных генов, что нарушает формирование памяти у дрозофилы.

Ориентировочно-исследовательскую активность изучали [15], используя стандартный метод “Открытое поле” (ОП) у линий крыс, селекционированных в лаборатории генетики ВНД Института физиологии им. И.П. Павлова по порогу возбудимости большеберцового нерва – высокому и низкому (ВП, НП), и имеющих соответствующие контрастные различия по возбудимости структур ЦНС и поведению (Биоколлекция Института физиологии им. И.П. Павлова РАН, патенты на селекционное достижение № 10769 и 10768, выданные ФГБУ “Государственная комиссия РФ по испытанию и охране селекционных достижений”, зарегистрировано в государственном реестре охраняемых селекционных достижений 15.01.2020).

В открытом поле у крыс опытной и двух контрольных [1, 3] групп регистрировали следующие параметры поведения: латентный период первого движения (с), горизонтальная двигательная активность (число пересеченных квадратов), вертикальная двигательная активность (подъем на задние лапы, число стоек), эмоциональность (количество болюсов), груминг (число актов), фризинг (число актов), повороты налево (число актов), повороты направо (число актов), кручения (число актов). Результаты оценки разных компонентов ориентировочно-исследовательского поведения у крыс двух линий ВП и НП, интактных и через 1 ч после 12-часовой экспозиции в экранирующей внешней магнитное поле и имитирующей камерах, показали, что само пребывание животных в замкнутом пространстве камер влияет на разные компоненты их поведения в ОП в зависимости от линейных характеристик. Вместе с тем, полученные данные позволили установить, что собственно фактор ослабления экранированием внешнего магнитного поля (ОМП) влияет только на высоковозбудимых крыс линии НП и заключается в увеличении актов фризинга и ротаций, свидетельствующем о возможном усилении реакции страха и тревожности в новой обстановке, по сравнению с соответствующими контрольными группами. Низковоозбудимые животные линии ВП не отреагировали изменением поведения в ответ на ОМПЗ.

Совокупность результатов этих исследований позволяет сделать вывод о стрессорном характере влияния фактора ослабления внешнего магнитного поля Земли, в основном, тормозящего деятельность нервной системы и зависящего от нейрофизиологического статуса организма.

*Воздействие ослабленного МП Земли  
на гематологические и гемодинамические  
показатели организма*

В работе Стефанова с соавторами [11] стояла задача изучить изменения форменных элементов крови и гемодинамических показателей в качестве реакции целостного организма на действие ОМПЗ. Объектом исследования служили самцы

крыс линии Вистар (возраст – 3 мес.). Использовалась экранирующая камера с ослаблением МП Земли (48 мкТл) в 40 раз, так что величина индукции МП внутри камеры составляла 1.2 мкТл. Контролем служили животные, помещенные в имитирующую камеру. Забор крови для гематологического анализа (Abacus junior Vet (Diatron, Австрия)) у опытных и контрольных групп крыс осуществляли до постановки опыта, а также через 7, 14 и 21 день после помещения крыс в соответствующие камеры, а также через 5–6 дней после окончания воздействия. Измеряли объем и содержание эритроцитов в крови, содержание гемоглобина в эритроцитах, содержание лейкоцитов, нейтрофилов, гранулоцитов, а также гемодинамические показатели (артериальное давление – систолическое, межсистолические интервалы, вариабельность сердечного ритма). Рассчитывались низкая частота сердечного ритма (маркер активности симпатической нервной системы) и высокая частота (характеризующая вагусную активность). Полученные результаты демонстрируют ответ изучаемых гематологических и гемодинамических показателей в обеих группах крыс (опытной и контрольной), направленный на поддержание гомеостаза. Для опытной группы крыс, испытывающих ОМПЗ, наблюдали также специфическое усиление активности парасимпатической нервной системы с последующей адаптацией через две недели.

*Воздействие ослабления МП Земли на различные клеточные культуры грызунов и человека*

В работе Спивак с соавторами [10] применялась экранирующая камера, ослабляющая МП Земли в 250 раз, так что внутри камеры величина индукции МП составляла 0.192 мкТл. Воздействие осуществлялось в течение 1–24 ч, интервалы измерения 2, 6 и 24 ч. В качестве модельных объектов авторы использовали первичные фибробласты кожи человека – здорового донора (VH10) и больного атаксией-телеангиэктазией (AT8SP). Протеинкиназа АТМ (ataxia telangiectasia mutated) является ключевым белком клеточного ответа на возникновение двунитевых разрывов ДНК и конформационные изменения хроматина. Среди многочисленных мишеней АТМ-белки P53 и P21. Было обнаружено, что при воздействии ОМП клетки здорового донора демонстрируют картину, подобную той, которая возникает при повреждении ДНК – повышение количества белков P53 и P21, формирование фокусов 53BP1, тогда как в первичных фибробластах больных атаксией-телеангиэктазией никаких видимых изменений обнаружено не было. Авторы полагают, что при действии ОМП в фибробластах здорового донора развивается окислительный стресс и, как следствие, активация АТМ-зависимого сигнального пути. Запуск окислительного стресса может

происходить согласно ион-радикальному механизму, предложенному Бучаченко [5]: нарушается работа супероксиддисмутаз (СОД), которые являются важнейшими ферментами внутриклеточной антирадикальной защиты первой линии у аэробных организмов, что приводит к накоплению в клетках кислородных радикалов.

В работе Надеева с соавторами [21] изучалось воздействие ОМП Земли (0.192 мкТл внутри экранирующей камеры) в сравнении с нормальным магнитным полем Земли (МП, 50 мкТл внутри имитирующей контрольной камеры) на эритроциты крысы *in vitro* в присутствии третбутилгидропероксида (ТБГ) в качестве индуктора оксидативного стресса. Степень воздействия ОМП на эритроциты крови крыс-самцов аутбредной линии Вистар оценивали по количеству в суспензии общего гемоглобина (показатель лизиса) и наличию в лизате оксигемоглобина (оксиГб) и метгемоглобина (метГб). Наличие метГб свидетельствовало о повреждении эритроцитов активными формами кислорода (АФК). Кроме того, впервые в таких биохимических работах, была определена концентрация АФК в замороженных пробах суспензии эритроцитов после 15 ч инкубации методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР спектрометр Bruker Elexsys E580) с использованием спиновой ловушки ТЕМРО. Установлено, что после 4 ч инкубации проб с высокими концентрациями ТБГ (>700 мкМ), экспонировавшиеся в ОМП эритроциты высвобождали больше гемоглобина ( $p < 0.05$ ) преимущественно в форме метГб (52–72%). Эритроциты, находившиеся в условиях ОМП, продуцировали больше АФК по сравнению с эритроцитами, находившимися в условиях обычного МП. Полученные данные свидетельствуют о том, что гипомангнитное поле нарушает функциональное состояние эритроцитов, ускоряя их гибель и усиливая эффекты оксидативного стресса.

Работа Богданова с соавторами [4] посвящена сравнительному исследованию воздействия ОМП Земли на жизнеспособность клеточных культур фибробластов мыши СЗН10Т1/2 и эритробластов человека К-562 в условиях индуцированного оксидативного стресса, вызванного хлоридом кобальта ( $\text{CoCl}_2$ ) – одного из самых токсичных загрязнителей окружающей среды. В данной работе использовались две цилиндрические экранирующие камеры с коэффициентами экранирования 100 и 250; соответствующие ОМП внутри камер составляли 0.48 и 0.192 мкТл. Время воздействия составляло 24 и 48 ч. Были использованы 2 разные клеточные линии. Пролиферативную активность и жизнеспособность клеточных культур К562 (хроническая миелогенная лейкемия человека, суспензионное культивирование) и СЗН10Т1/2 (фибробластоподобная линия эмбрионов мышей, монослойное культивирование) определяли с помощью МТТ-теста [20].

Статистически значимые различия в количестве жизнеспособных клеток после инкубации с экспозицией в МП Земли и в ОМП Земли, как на голодной среде ( $p < 0.05$ ), так и в среде с 10% сыворотки ( $p < 0.05$ ), проявились только на вторые сутки инкубирования культуры с  $\text{CoCl}_2$  (500 мкМ). Кроме этого на вторые сутки наблюдалось двукратное снижение жизнеспособных клеток, инкубированных в присутствии 250 мкМ  $\text{CoCl}_2$ , по сравнению с контрольной группой. Был сделан вывод о том, что ослабление магнитного поля Земли усиливает чувствительность клеток к токсичному воздействию  $\text{CoCl}_2$ . Это особенно ярко проявляется при культивировании на бессывороточной среде, которая лишена содержащихся в сыворотке антиоксидантов. Авторы предполагают, что полученные эффекты связаны с изменением активности оксидоредуктазных ферментов в ОМП. Цитотоксический эффект кобальта (II) в условиях ОМП может приводить к избытку АФК, индуцируя оксидативный стресс, апоптоз и некроз клеток.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Магнитное поле Земли – важнейший физический фактор воздействия на организм человека и животных, обеспечивающий поддержание разных сторон его жизнедеятельности. Магниторецепция у исследованных объектов находится в разной степени изученности. У пчелы магниторецепторами, которые они успешно используют для ориентации в пространстве, служат кристаллы  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , расположенные в клетках жирового тела в брюшке [23]. Обсуждается роль в рецепции магнитных полей насекомыми светочувствительного пигмента криптохрома [22]. У крыс механизмы магниторецепции не изучены.

Как показали результаты исследований, представленные в обзоре, многократное ослабление МПЗ за счет создания условий его экранирования, приводит к изменениям на поведенческом, клеточном, молекулярном уровнях, что продемонстрировано на насекомых – дрозофиле и медоносной пчеле, а также млекопитающих – крысе и биоматериале человека. Совокупность полученных результатов позволяет отнести исследуемое воздействие к стресс-факторам, действующим на все уровни жизнедеятельности организма, включая генетический аппарат. Внутриклеточные механизмы влияния ослабленного магнитного поля могут развиваться по типу оксидативного стресса. Характер реакции на ОМПЗ зависит от исходного генетически-детерминированного функционального состояния организма (порогов возбужденности нервной системы, биохимического статуса).

Важно подчеркнуть, что пребывание крыс в замкнутом пространстве контрольных камер, независимо от характеристик статического магнитного поля, негативным образом сказывалось на

всех изученных показателях. Однако специфическим для ОМПЗ явился четко выраженный тормозящий эффект, проявляющийся как на поведенческом, так и на организменном уровне (усиление тормозной функции вагуса). Аналогичное тормозное воздействие на способность к обучению и ориентировочно-исследовательскую активность крыс наблюдали при воздействии на них слабых статических магнитных полей в естественной среде, вызываемых современными устройствами (средства связи и др.) [18]. По-видимому, именно слабое статическое магнитное поле, возникающее в опытных условиях при ослаблении МПЗ, является действующим стрессорным фактором.

Следует обратить внимание на такой негативный аспект в действии ОМПЗ, как возможное усиление чувствительности к влиянию токсических веществ ( $\text{CoCl}_2$ ) [4]. Вместе с тем в той же работе отмечен потенциально важный терапевтический эффект воздействия ОМПЗ – замедление роста раковых и эндотелиальных клеток.

В настоящее время слабые статические магнитные поля широко используются в медицине [см. обзор 14]. Однако эффекты естественных и искусственных слабых статических магнитных полей и механизмов магниторецепции несомненно требуют дальнейшего детального изучения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агаджанян Н.А., Макарова И.И. Магнитное поле Земли и организм человека // Экол. Человека. 2005. № 9. С. 3–9.
2. Бинги В.Н. Физические механизмы магнитобиологических явлений. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. М: Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 2005. 49 с.
3. Бинги В.Н., Мияев В.А., Саримов Р.М., Заруцкий А.А. Влияние “нулевого” магнитного и электростатического полей на психофизиологическое состояние человека // Биомед. Радиоэлектроника. 2006. Т. 8–9. С. 48–58.
4. Богданов В.А., Сакута Г.А., Стефанов В.Е., Сурма С.В., Захаров Г.А., Щеголев Б.Ф. Воздействие ослабленного магнитного поля Земли на пролиферативную активность и жизнеспособность клеток K562 и СН10Т1/2 // Биофизика. 2018. Т. 63. № 6. С. 1164–1170.
5. Бучаченко А.Л. Магнитно-зависимые молекулярные и химические процессы в биохимии, генетике и медицине // Успехи химии. 2014. Т. 83. № 1. С. 1–12.
6. Васильева С.А., Токмачева Е.В., Медведева А.В., Ермилова А.А., Никитина Е.А., Щеголев Б.Ф., Сурма С.В., Савватеева-Попова Е.В. Роль родительского происхождения хромосом в нестабильности соматического генома клеток мозга дрозофилы и формировании памятного следа в норме и при стрессе // Цитология. 2019. Т. 61. № 12. С. 951–963.
7. Дубров А.П. Геомагнитное поле и жизнь. Краткий очерк по геомагнитобиологии. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1978. 176 с.

8. Лопатина Н.Г., Зачепило Т.Г., Дюжикова 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. Т. 1. № 3. С. 231–241.
9. Никитина Е.А., Медведева А.В., Герасименко В.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 *Drosophila melanogaster* // Журн. высш. нерв. деят. им. И.П. Павлова. 2017. Т. 67. № 2. С. 246–256.
10. Спивак И.М., Куранова М.Л., Мавропуло-Столяренко Г.Р., Сурма С.В., Щеголев Б.Ф., Стефанов В.Е. Клеточный ответ на воздействие сверхслабых статических магнитных полей // Биофизика. 2016. Т. 61. № 3. С. 516–522.
11. Стефанов В.Е., Щеголев Б.Ф., Крячко О.В., Спивак И.М., Кузьменко Н.В., Сурма С.В. Модельное исследование биологических эффектов слабых статических магнитных полей на организменном и субклеточном уровнях // Докл. АН. 2015. Т. 461. № 4. С. 485–488.
12. Сурма С.В., Кузнецов П.А., Хрусталева Р.С., Песков Т.В., Щеголев Б.Ф. Устройство для исследования влияния электромагнитных полей на биологические объекты. Патент RU 2454675. 2012.
13. Труханов К.А. Некоторые магнитобиологические аспекты длительных и дальних космических полетов // Радиаци. Биол. Радиоэкология. 2003. Т. 43. № 5. С. 584–589.
14. Франциянц Е.М., Шейко Е.А. Противоопухолевое действие электромагнитных полей и их влияние на боль в экспериментальной и клинической онкологии // Исследования и практика в медицине. 2019. Т. 6. № 2. С. 86–99.
15. 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 кон-  
 тральной возбудимостью нервной системы // Интегр. Физиол. 2020. Т. 1. № 2. С. 126–136.
16. Belyavskaya N.A. Biological effects due to weak magnetic field on plants // *Advances in Space Research*. 2004. V. 34. P. 1566–1574.
17. Bitterman M.E., Menzel R., Fietz A., Schäfer S. Classical conditioning of proboscis extension in honeybees (*Apis mellifera*) // *J. Comp. Physiol.* 1983. V. 97. № 2. P. 107–119.
18. 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 ( $\leq 1$  mT) in humans and vertebrates: A systematic review // *PLoS ONE*. 2020. V. 15. № 6. P. 1–18.
19. Jia B., Shang P. Research progress of biological effects of hypomagnetic fields // *Space Med. Med. Eng.* 2009. V. 22. P. 308–312.
20. Mosmann T. Rapid colorimetric assay for cellular growth and survival: application to proliferation and cytotoxicity assays // *J. Immunol. Methods*. 1983. V. 65. № 1–2. P. 55–63.
21. Nadeev A.D., Terpilowski M.A., Bogdanov V.A., Khmelevskoy D.A., Shchegolev B.F. Surma S.V., Stefanov V.E., Jenkins R.O., Goncharov N.V. Effects of exposure of rat erythrocytes to a hypogeomagnetic field // *Biomed. Spectrosc. Imaging*. 2018. V. 7. № 3–4. P. 105–113.
22. Sheppard D.M.W., Li J., Henbest K.B., Neil S.R.T., Maeda K., Storey J., Schleicher E., Biskup T., Rodriguez R., Weber S., Hore P.J., Timmel C.R., Mackenzie S.R. Millitesla magnetic field effects on the photocycle of an animal cryptochrome // *Scientific Reports*. 2017. V. 7. P. 42228. P. 1–7.
23. Válková T., Vácha M. How do honeybees use their magnetic compass? Can they see the North? // *Bull. Entomol. Res.* 2012. V. 102. № 4. P. 461–467.
24. Zhadin M.N. Review of Russian literature on biological action of DC and low-frequency AC magnetic fields // *Bioelectromagnetics*. 2001. V. 22. № 1. P. 27–45.

## Biological Effects of Weakened Geomagnetic Field's Impact

B. F. Shchegolev<sup>1</sup>, S. V. Surma<sup>1</sup>, V. E. Stefanov<sup>2</sup>, M. B. Pavlova<sup>1, \*</sup>, N. V. Shiryaeva<sup>1</sup>,  
 T. G. Zachepilo<sup>1</sup>, and N. G. Lopatina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pavlov Institute of Physiology, RAS, St. Petersburg, 199034 Russia

<sup>2</sup> Faculty of Biology, State University, St. Petersburg, 199034 Russia

\*e-mail: pavlova@infran.ru

**Abstract**—The survey summarizes results of original research on the impact of geomagnetic field weakened by shielding upon a wide range of behavioral, physiological and molecular-cell characteristics of insects (*Drosophila melanogaster*, honey bee) and mammals (rats), as well as some rodents' and human cell cultures. The study detected the absopal effect which amplifies the inhibitory function of the nervous system and is specific to the weakened geomagnetic field. The nature of the effect depends on genetically determined neurophysiological and biochemical characteristics of a biological object.

**Keywords:** geomagnetic field, magnetic shielding, magneto biological effects (MBE) stress, blood, hemodynamic parameters, learning and memory, exploratory-trying activity, excitability, cell cultures, *Drosophila melanogaster*, honey bee, rats