

Влияние изменений электромагнитных полей на пищевую и когнитивную активность медоносной пчелы

Н. Г. Лопатина¹, Т. Г. Зачепило^{✉1}, Н. А. Дюжикова¹, Н. Г. Камышев¹,
С. В. Сурма¹, И. Н. Серов², Б. Ф. Щеголев¹

¹ Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, 199034, Россия, Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 6
² Фонд исследований генома человека «Айрэс», 197342, Россия, Санкт-Петербург, Выборгская наб., д. 61А

Сведения об авторах

Нина Георгиевна Лопатина, SPIN-код: 2856-6180, Scopus AuthorID: 35526198700, ORCID: 0000-0003-1392-4002, e-mail: lopatina_ng@mail.ru

Татьяна Геннадьевна Зачепило, SPIN-код: 7746-2208, Scopus Author ID: 6506211770, ORCID: 0000-0001-6350-7050, e-mail: polosataya2@mail.ru

Наталья Алековна Дюжикова, SPIN-код: 6206-3889, Scopus Author ID: 6603486439, ORCID: 0000-0002-7550-118X, e-mail: dyuzhikova@mail.ru

Николай Григорьевич Камышев, SPIN-код: 4461-9955, Scopus AuthorID: 6603773316, ORCID: 0000-0002-3611-7417, e-mail: kamyshevng@infran.ru

Сергей Викторович Сурма, SPIN-код: 7059-0259, ORCID: 0000-0003-4505-0995, e-mail: svs-infran@yandex.ru

Игорь Николаевич Серов, e-mail: director@aires.fund

Борис Федорович Щеголев, SPIN-код: 1239-3324, Scopus Author ID: 6701534523, ORCID: 0000-0001-5500-2837, e-mail: shcheg@mail.ru

Для цитирования:

Лопатина, Н. Г., Зачепило, Т. Г., Дюжикова, Н. А., Камышев, Н. Г., Сурма, С. В., Серов, И. Н., Щеголев, Б. Ф. (2020) Влияние изменений электромагнитных полей на пищевую и когнитивную активность медоносной пчелы. *Интегративная физиология*, т. 1, № 3, с. 231–241. DOI: 10.33910/2687-1270-2020-1-3-231-241

Получена 22 июля 2019; прошла рецензирование 5 февраля 2020; принята 5 февраля 2020.

Права: © Авторы (2020). Опубликовано Российским государственным педагогическим университетом им. А. И. Герцена. Открытый доступ на условиях лицензии CC BY-NC 4.0.

Аннотация. Прогресс в области информационных технологий, средств глобальной беспроводной связи приводит к изменениям в естественном электромагнитном фоне Земли и экологической безопасности живых организмов. Представляется актуальным исследовать влияние техногенных и естественных электромагнитных полей с использованием модельных биологических объектов, включая медоносную пчелу, особо чувствительную к действию электромагнитных излучений (ЭМИ) в связи с врожденной необходимостью их использования в естественной среде обитания. Разрабатываемые системы защиты от ЭМИ за счет изменения характеристик излучения могут также вызывать специфические магнитобиологические реакции живых систем. В настоящей работе на медоносной пчеле (*Apis mellifera* L.) изучено влияние на врожденные и когнитивные компоненты поведения устройств — резонаторов ЭМИ, действующих изолированно и вкупе с Wi-Fi-роутером, а также изменений (ослабления/усиления) магнитного поля в месте проведения эксперимента относительно магнитного поля Земли. Показано угнетающее действие на процессы формирования памяти всех изучаемых факторов, кроме усиленного магнитного поля (стимулирующее воздействие). При этом наиболее глубокие изменения в процессы формирования памяти вносит изменение магнитных полей. Как ослабление, так и усиление магнитного поля значительно ингибирует долговременную память. Наблюдаемые изменения в процессах формирования памяти неизбежно отразятся на летной пищедобывательной активности и в целом на продуктивности семей медоносных пчел.

Ключевые слова: медоносная пчела, электромагнитные поля, кратковременная память, долговременная память.

The impact of changes in electromagnetic fields on food and cognitive behaviour of the honeybee

N. G. Lopatina¹, T. G. Zachepilo^{✉1}, N. A. Dyuzhikova¹, N. G. Kamyshev¹, S. V. Surma¹, I. N. Serov², B. F. Shchegolev¹

¹ Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, 6 Makarova Emb., Saint Petersburg 199034, Russia

² Aires Human Genome Research Foundation, 61A Vyborgskaya Emb., Saint Petersburg 197342, Russia

Authors

Nina G. Lopatina, SPIN: 2856-6180, Scopus AuthorID: 35526198700, ORCID: 0000-0003-1392-4002, e-mail: lopatina_ng@mail.ru

Tatiana G. Zachepilo, SPIN: 7746-2208, Scopus Author ID: 6506211770, ORCID: 0000-0001-6350-7050, e-mail: polosataya2@mail.ru

Natalia A. Dyuzhikova, SPIN: 6206-3889, Scopus Author ID: 6603486439, ORCID: 0000-0002-7550-118X, e-mail: dyuzhikova@mail.ru

Nikolai G. Kamyshev, SPIN: 4461-9955, Scopus AuthorID: 6603773316, ORCID: 0000-0002-3611-7417, e-mail: kamyshevng@infran.ru

Sergey V. Surma, SPIN: 7059-0259, ORCID: 0000-0003-4505-0995, e-mail: svs-infran@yandex.ru

Igor N. Serov, e-mail: director@aires.fund

Boris F. Shchegolev, SPIN: 1239-3324, Scopus Author ID: 6701534523, ORCID: 0000-0001-5500-2837, e-mail: shcheg@mail.ru

For citation: Lopatina, N. G., Zachepilo, T. G., Dyuzhikova, N. A., Kamyshev, N. G., Surma, S. V., Serov, I. N., Shchegolev, B. F. (2020) The impact of changes in electromagnetic fields on food and cognitive behaviour of the honeybee. *Integrative Physiology*, vol. 1, no. 3, pp. 231–241. DOI: 10.33910/2687-1270-2020-1-3-231-241

Received 22 July 2019; reviewed 5 February 2020; accepted 5 February 2020.

Copyright: © The Authors (2020). Published by Herzen State Pedagogical University of Russia. Open access under CC BY-NC License 4.0.

Abstract. Progress in the field of information technology and global wireless communications leads to changes in the natural electromagnetic background of the Earth and affects living organisms. Therefore, it is relevant to investigate the influence of technogenic and natural electromagnetic fields using model biological objects, including a honeybee, which is particularly sensitive to electromagnetic radiation (EMR). Current EMR protection systems that change the characteristics of electromagnetic radiation can also cause specific magneto-biological reactions in living systems. In this study we used the honeybee (*Apis mellifera* L.) to assess the effect of devices on the innate and cognitive components of the honeybee behavior. The devices included EMR resonators working in isolation and together with a WiFi router. We also changed (weakened/enhanced) the magnetic field relative to the Earth's magnetic field at the experiment location. The experiments found that all the factors under study, except for the enhanced magnetic field that produced a stimulating effect, have an inhibitory effect on the memory formation. Besides, both weakening and enhancement of the magnetic field significantly inhibits long-term memory. The observed changes in memory formation will inevitably affect the flight patterns and food-finding mechanisms in bees and, in general, the productivity of honeybee colonies.

Keywords: honeybee, electromagnetic fields, short-term memory, long-term memory.

Введение

Параллельно прогрессу в области информационных технологий, широкому распространению в связи с этим средств глобальной беспроводной связи, нарастает угроза равновесию биосферы Земли, экологической безопасности живых организмов. О стрессорном отрицатель-

ном воздействии нарушений электромагнитного фона окружающей среды на различные системы организма человека, животных и растений свидетельствуют многочисленные исследования последних 10–20 лет (van Rongen et al. 2009; Saliev et al. 2018). Многолетние исследования, проведенные зарубежными учеными (см. обзор Cucurachi et al. 2013) и нами (Лопатина и др.

2019), подтверждают негативный стрессорный характер влияния электромагнитных излучений (ЭМИ) на поведение и жизнедеятельность насекомых, включая медоносную пчелу. При этом выявлена связь между размерами тела насекомого, диэлектрическими свойствами объекта и величиной абсорбции ЭМИ: максимум абсорбции наблюдали при длине волны, сравнимой с размерами тела насекомого (Thielens et al. 2018). Под воздействием ЭМИ у насекомых изменяется нейрональная активность в центральных и периферических отделах нервной системы (Wyszkowska et al. 2016), а также транскрипционная активность генома (Manta et al. 2017), что приводит, в частности, к повышению продукции стресс-белка HSP70 (Wyszkowska et al. 2016). Полученные данные (Cammaerts et al. 2012; Лопатина и др. 2019; Shepherd et al. 2018; 2019; Zhang et al. 2016; El Halabi et al. 2013 и др.) свидетельствовали о редукции у насекомых, включая пчел, когнитивной, локомоторной и репродуктивной активности. Из обзоров (Лопатина и др. 2018; Cucurachi et al. 2013) можно почерпнуть сведения об ущербе, наносимом электромагнитными загрязнениями среды сельскому хозяйству. Механизмы влияния ЭМИ на поведение и другие формы жизнедеятельности живых организмов интенсивно изучаются, однако биологическая основа рецепции ЭМИ достоверно не выяснена.

Разрабатываемые системы защиты от ЭМИ за счет снижения мощности, изменения пространственных характеристик, отражения ЭМИ (Jasaitis et al. 2018) в совокупности с другими источниками излучения могут также вызывать специфические магнитобиологические реакции живых систем. Представляется актуальным исследовать их влияние с использованием модельных биологических объектов, включая насекомых (медоносная пчела).

Значимым экологическим фактором является магнитное поле Земли. Его изменения приводят к сбою в работе эндогенных механизмов, лежащих в основе деятельности ЦНС (Холодов, Лебедева 1992; Леднев и др. 2008; Cook et al. 2006) и, таким образом, всех систем организма. Ослабление магнитного поля в месте проведения эксперимента является для животного стрессорным фактором (Никитина и др. 2013).

Механизмы восприятия и воздействия магнитных полей активно обсуждаются в литературе. Наиболее обоснованной и значимой в объяснении биологических и медицинских эффектов ЭМИ и магнитных полей многими авторами (см. обзор: Бучаченко 2014) представляется молекулярная концепция, главным структурным элементом которой является ион-

радикальная пара — приемник магнитных полей и источник магнитных эффектов. Следует особо подчеркнуть, что существование таких пар обнаружено в двух главных жизнеобеспечивающих биохимических процессах — в ферментативном синтезе АТФ и ДНК (Бучаченко 2014).

Магниторецепторами у пчелы служат кристаллы Fe_3O_4 , расположенные в клетках жирового тела в брюшке, а хитиновый покров пчелы обладает полупроводниковыми свойствами (Kumar et al. 2011; Wyszkowska et al. 2016). В процессе полета и при передвижении по сотам в улье пчелы генерируют постоянные и модулируемые электрические поля, сенсорами которых служит Джонстонов орган и другие механорецепторы, расположенные на антеннах и теле особи (Еськов 2018; Greggers et al. 2013). Обсуждается роль в рецепции пчелы электромагнитных полей светочувствительного пигмента криптохрома (Sheppard et al. 2017). Пчела, ориентируясь в пространстве в условиях полета к отдаленным источникам корма, использует изменения локального геомагнитного поля Земли (Válková, Vácha 2012).

Влияние изменения магнитного поля на когнитивную способность пчелы ранее не изучалось.

Таким образом, в задачи настоящей работы входило изучение влияний на пищевое поведение медоносной пчелы (обонятельной, пищевой возбудимости, условно-рефлекторной деятельности): 1) резонаторов «Aires Defender Pro» (далее — резонаторы), разработанных Фондом исследований генома человека «Айрэс» (патенты № 2231137 и 2230580 от 20.06.2004), действующие изолированно и в купе с Wi-Fi-роутером; 2) изменений — ослабления/усиления внешнего магнитного поля в месте проведения эксперимента за счет применения экранирующей камеры и кольцевых магнитов.

Материал и методы

Исследования проводили на рабочих особях медоносной пчелы *Apis mellifera* L. в возрасте 7–30 дней в летний период 2018 года (июнь–август) (Колтуши, Всеволожский р-н, Ленинградская область, Россия). Пчел содержали в небольших ульях в комнатном помещении, в сетчатой камере при t 20–25 °С. Пчелы были обеспечены белковым, углеводным кормом, водой. Очистительные облеты пчелы могли совершать ежедневно.

1. Для оценки влияния резонаторов «Aires Defender Pro» использовали 6 пластин, которые размещали в центре каждой грани клетки

Фарадея, отсекающей внешние электрические поля (рис. 1). Используемая пластина за счет поляризационных свойств и поверхностной структуры ведет себя как многочастотный резонатор, способствующий преобразованию возбуждающего излучения в набор собственных гармоник резонатора (Копыльцов и др. 2007; Серов и др. 2006).

В работе использовали стандартный Wi-Fi роутер (беспроводной маршрутизатор LinkSys E1200-EE/RU) со следующими техническими характеристиками: частота беспроводной связи — 2,4 ГГц, количество и тип антенн — 2 внутренние антенны, коэффициент усиления штатной антенны (антенн) — 4 дБи. Роутер располагали в клетке Фарадея (стальная сетка, размер ячеек — 1 мм) на съемной полке под крышкой строго по центру камеры.

Протокол опыта. Пчел изолировали от семьи и помещали в количестве 20 особей в сетчатую пробирку (объем 120 см³) с кормом. Пробирку выкладывали на дно клетки Фарадея в центр на 24 часа. В опытном варианте в клетке Фарадея находился тот или иной изучаемый источник воздействия. Контролем служили пчелы, помещенные на 24 часа в сетчатую пробирку с кормом, выложенную на дно в центр клетки Фарадея, лишённую резонаторов, а также интактные пчелы в сетчатых пробирках такого же размера с кормом, расположенные вне клетки

в том же помещении с температурой 23 °С. За 3 часа до процедуры обучения корм из пробирки удаляли. Процедуры обучения и тестирования осуществляли вне клетки Фарадея. Каждый опыт повторяли трижды.

2. Для создания условий ослабления внешнего магнитного поля (МП) использовали экранирующую камеру из немагнитного материала, на которую было намотано покрытие, выполненное из аморфного магнитомягкого материала АМАГ-172, что обеспечило уменьшение величины индукции магнитного поля Земли внутри камеры с 45 мкТл в месте проведения экспериментов до 0,1 мкТл внутри камеры. Для контроля использовали имитирующую камеру, которая была изготовлена из того же немагнитного материала, но в качестве покрытия использован черный полиэтилен. Обе камеры были выполнены в виде цилиндров диаметром 10 см и высотой 25 см, закрытые с одного торца и открытые с другого, так чтобы в глубину камеры на середину ее оси легко помещалась сетчатая пробирка с 7 пчелами (размер пробирки: длина — 6 см, диаметр — 2,5 см).

Для создания условий усиления внешнего магнитного поля использовали 2 кольцевых магнита, расположенных по одной оси друг напротив друга, так что в месте помещения пробирки с 7 пчелами индукция суммарного МП составляла 200 мкТл.

«Клетка Фарадея» для исследований

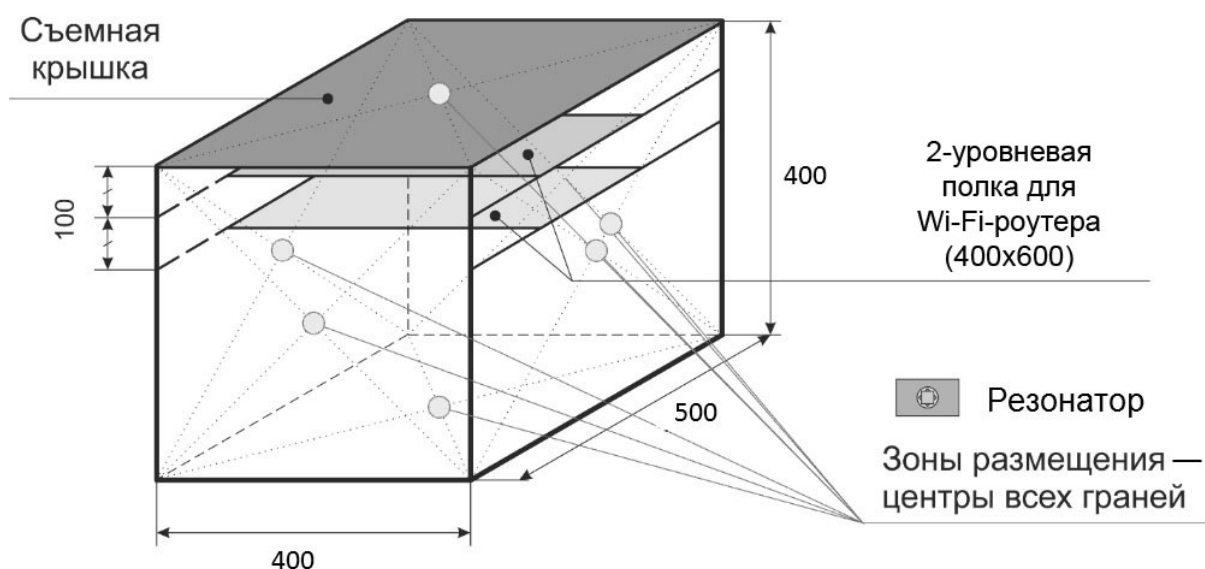


Рис. 1. Схема камеры («клетки Фарадея»), используемой для исследования, с изображением зоны размещения резонаторов

Fig. 1. The layout of the chamber (“the Faraday cage”) and the location of resonators used in the study

Величину индукции магнитного поля измеряли трехкомпонентным магнитометром НВ0302.1А (ООО «Магнитные приборы», Россия) с диапазоном измерений 0,1–100 мкТл и трехкомпонентным магнитометром НВ0305.2А на основе датчиков Холла (ООО «Магнитные приборы», Россия) с диапазонами измерений 10 мТл и 100 мТл.

В этих экспериментах участвовали 4 группы пчел: 2 опытные и 2 контрольные. Первая опытная группа находилась в экранирующей камере, ослабляющей внешнее магнитное поле (ОМП). Вторая опытная группа — в условиях усиления магнитного поля (УМП). Третья группа — контроль 1, в камере, имитирующей экранирующий цилиндр. Четвертая группа — контроль 2, интактные пчелы (без воздействия).

Протокол опыта заключался в следующем. Накануне испытаний пчел изолировали из улья, размещали по 4 сетчатым пробиркам с кормом, по 7 особей в каждой, которых далее подвергали описанным выше воздействиям в течение 12 часов (20:00–8:00). Период воздействия совпадал с темновой фазой циркадного ритма. По окончании воздействия у пчел изымали корм и помещали на 1 час в условия с нормальным уровнем магнитного поля и температурой 25 °С. Интактные пчелы находились 13 (12+1) часов вне улья в пробирке такого же размера, но не подвергались воздействиям. Затем приступали к процедуре обучения. Каждую серию опытов повторяли по 6–7 раз.

Использовали **метод условного рефлекса** — вырабатывали условный пищевой рефлекс вытягивания хоботка (*Proboscis Extension Reflex*, PER) на обонятельный раздражитель (Bitterman et al. 1983), однократно сочетая запах гвоздики с пищевым подкреплением (50 % раствор сахара) и проверяли его сохранение в кратковременной (через 1 мин после процедуры обучения) и долговременной (через 180 мин после процедуры обучения) памяти путем дистантного предъявления условного раздражителя — запаха гвоздики. Деление памяти пчелы на фазы приведено согласно работе (Menzel 1999). Для выработки условного рефлекса пчел, обездвиженных с помощью холодового наркоза, иммобилизовали за крылья специальными зажимами и помещали в установку, позволяющую одновременно тестировать 18 особей. Установка представляет собой горизонтальный металлический стержень с отверстиями для фиксаторов пчел, разнесенных друг от друга на 20 см. Обучение начинали через 30 минут после наркоза. Процедура обучения заключалась в следующем. К антеннам пчел (без соприкос-

новения с ними) подносили на стеклянной лопаточке каплю ароматизированного гвоздичной сахарного раствора. На протяжении 5 сек регистрировали число пчел, отвечающих спонтанной реакцией вытягивания хоботка на запах (обонятельная возбудимость). Затем каплю ароматизированного раствора приводили в соприкосновение с антеннами, где у пчел расположены обонятельные и вкусовые рецепторы, регистрируя при этом наличие (отсутствие) безусловного врожденного пищевого рефлекса — вытягивания хоботка (пищевая возбудимость). Далее — пчела, высунувшая хоботок, могла в течение 2 секунд насасывать сахарный раствор (пищевое подкрепление условного сигнала — запаха гвоздики). Пчелы, демонстрирующие спонтанную реакцию и, напротив, не ответившие безусловно-рефлекторной пищевой реакцией, в дальнейших экспериментах не участвовали. Полученные данные обрабатывали статистически с использованием непараметрических критериев Манна — Уитни и χ^2 .

Результаты и обсуждение

1. Результаты изучения влияния резонаторов на пищевую возбудимость и кратковременную память приведены на рис. 2. Как можно видеть на рисунке, резонаторы изолированно и вкупе с роутером снижали как число пчел, отвечающих безусловно-рефлекторной пищевой реакцией (рис. 2а), так и число пчел, отвечающих условно-рефлекторной реакцией (рис. 2б) через 1 минуту после окончания процедуры обучения. Последнее оказалось сопоставимо с действием роутера (Лопатина и др. 2017).

На долговременную память резонаторы влияния не оказали. В то же время, действуя вкупе с роутером, резонаторы нивелировали его стимулирующий долговременную память эффект (Лопатина и др. 2017). В среднем 88 % пчел ответили условной реакцией через 180 минут по окончании процедуры обучения, как в контрольной группе, так и в двух опытных (воздействие резонатора — изолированно и вкупе с роутером)

Следует отметить, что в опытах на млекопитающих (крысах) резонаторы также купировали вызванные роутером нарушения долговременной памяти (Дюжикова и др. 2018). Различия в действии резонаторов на краткосрочные и долговременно текущие процессы, возможно, связаны с различиями механизмов формирования памяти. Как известно, в основе формирования кратковременной памяти лежит реверберация электрических импульсов в замкнутом

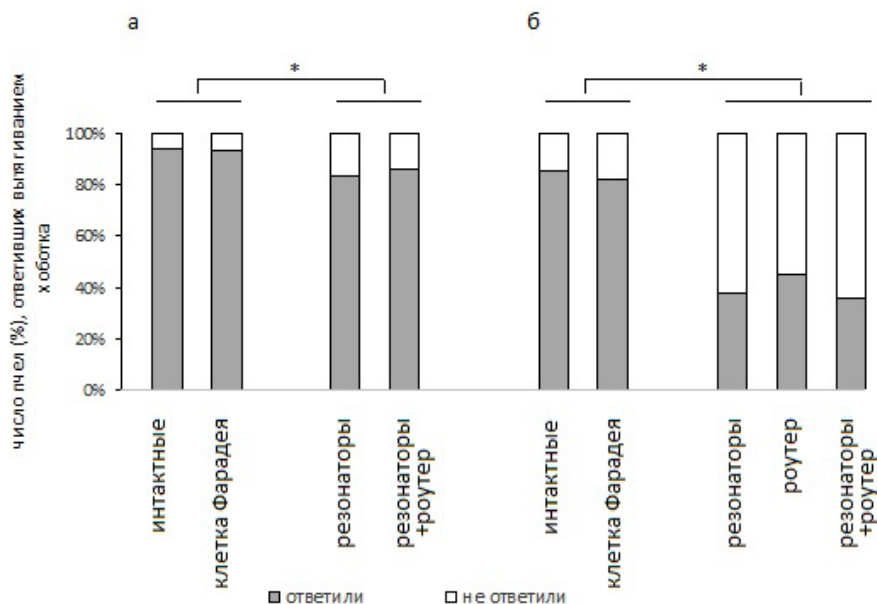


Рис. 2. Влияние резонаторов, действующих изолированно и вкпе с роутером, на пищевую возбудимость (а) и кратковременную память (б) пчелы

Fig. 2. The effect of resonators working in isolation and together with the router on the honeybee feeding excitability (a) and short-term memory (b)

контуре в течение нескольких минут после обучения, тогда как долговременная память требует работы генома, синтеза новых белков и перестройки синаптического аппарата нейронов (Lisman 2017).

На обонятельную возбудимость изучаемые факторы воздействия не оказали. Число пчел, ответивших спонтанной реакцией вытягивания хоботка на запах, составляло в среднем 2,8% как в контроле, так и в опыте.

Подытоживая эту часть исследований, следует сделать заключение о необходимости тестирования на живых объектах устройств, разрабатываемых с целью устранения негативных последствий влияния ЭМИ.

2. Результаты изучения влияний ОМП

и УМП показали, что ни одно из используемых воздействий не оказало влияния ни на сенсорную, ни на пищевую возбудимость. Спонтанные реакции у пчел в этих испытаниях отсутствовали. Число пчел, ответивших врожденной пищевой реакцией, составило в среднем 56,9% как в контрольных, так и опытных группах. Результаты исследований кратковременной и долговременной памяти медоносной пчелы представлены на рисунке 3.

Как можно видеть на рисунке 3, двенадцати-часовое пребывание в условиях ОМП резко снизило способность пчел удерживать в кратковременной памяти выработанный условный

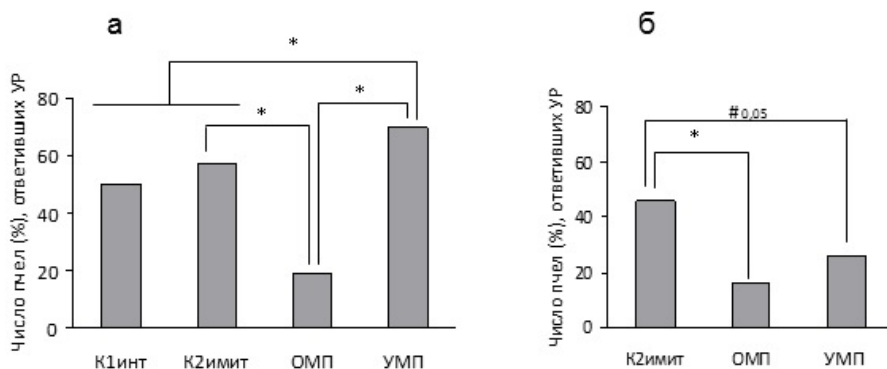


Рис. 3. Влияние ослабленного (ОМП) и усиленного (УМП) магнитного поля на кратковременную (а) и долговременную (б) память пчелы

* — различия достоверны, $p \leq 0,01$. # — различия достоверны, $p \leq 0,05$

Fig. 3. The effect of weakened (WMF) and enhanced (EMF) magnetic field on short-term (a) and long-term (b) honeybee memory

* — difference is significant, $p \leq 0.01$. # — difference is significant, $p \leq 0.05$

пищевой рефлекс на обонятельный раздражитель. Противоположное стимулирующее влияние было выявлено у пчел в группе УМП. Между контрольными пчелами различий не наблюдалось (рис. 3а).

Способность пчел сохранять в долговременной памяти выработанные условные рефлексы оказалась сниженной в обеих группах — ОМП и УМП — по сравнению с контрольной (рис. 3б).

Тормозящее условно-рефлекторную деятельность влияние ОМП было ранее выявлено на другом виде насекомых — дрозофиле (Никитина и др. 2017). На дрозофиле линии дикого типа CS изучали действие ОМП на способность насекомого вырабатывать и сохранять в течение 3 часов в памяти иной вид условного рефлекса — условно-рефлекторное подавление ухаживания, используя идентичную экранирующую камеру. Протокол опыта был также идентичен. Экранирование проводили в течение 12 часов. Нахождение в экранирующей камере совпадало по времени с темновой фазой циркадного ритма (20:00–8:00). После воздействия мух оставляли в течение 1 ч при температуре 25 °C и нормального уровня МП Земли (48 мкТл), а затем использовали в эксперименте. Во всех вариантах опыта применяли интактный контроль (без воздействия). ОМП не повлияло на способность к обучению дрозофилы — непосредственно сразу после тренировки у мух наблюдался высокий индекс обучения (ИО), но через 3 часа ИО достоверно снижался, что свидетельствовало о нарушениях в процессе формирования памяти. Параллельное изучение транскрипционной активности у мух, а также участие в этих экспериментах мутантов дрозофилы *agn^{ts3}* (измененная структура гена *limk1*) позволило авторам работы высказать некоторые соображения по поводу механизмов воздействия ОМП. Изменение в транскрипционной активности у насекомых под влиянием ОМП позволило предположить нарушение в работе различных клеточных сигнальных каскадов, регулирующих процессы, связанные с приобретением индивидуального опыта и его сохранением в памяти.

Парадоксальная реакция на ОМП мутантов *agn^{ts3}* — полное восстановление подавленной действием мутации способности к обучению и сохранению в памяти условной реакции — позволило авторам цитируемой работы говорить об участии в этих процессах гена *limk1*, возможное изменение активности которого под влиянием ОМП ведет к изменению функции фермента LIMK1 — ключевого в ремоделировании актина, многофункциональная роль которого в работе генетического аппарата и синтеза хорошо известна (Bernard 2007).

Таким образом, двенадцатичасовое ослабление магнитного поля оказало влияние на когнитивную деятельность насекомых — пчелы и дрозофилы, — ингибируя процессы, участвующие в формировании как кратковременной (пчела), так и долговременной (пчела и дрозофила) памяти. Действие усиленного магнитного поля на пчелу оказалось разнонаправленным: стимулирующим кратковременную и ингибирующим долговременную память. Полученные данные подтверждают тезис о высокой чувствительности пчел к изменениям магнитного поля. При этом наиболее глубокие изменения в функционировании высших отделов головного мозга пчелы оказывает ОМП.

Нарушение процессов формирования памяти у медоносной пчелы, влияя на процессы мобилизации пчел на посещение источника пищи, снижая способность к пространственной ориентации как при полетах за взятком, так и при возвращении в улей, естественно может пагубно сказываться на пищедобывательной, а следовательно, и опылительной, и в целом продуктивной активности семьи медоносной пчелы (Лопатина и др. 2017).

Влияние изменений МП на когнитивную (условно-рефлекторную) деятельность насекомых показано впервые. Существующая общность механизмов формирования памяти у беспозвоночных и позвоночных животных на молекулярном уровне позволяет использовать насекомых (медоносную пчелу и дрозофилу) в качестве модельных объектов для изучения физиологических и медицинских аспектов действия электромагнитных полей.

Список литературы

- Бучаченко, А. Л. (2014) Магнитно-зависимые молекулярные и химические процессы в биохимии, генетике и медицине. *Успехи химии*, т. 83, № 1, с. 1–12.
- Дюжикова, Н. А., Копыльцов, А. В., Коршунов, К. А. и др. (2018) Действие электромагнитного излучения высокой частоты и влияние резонаторов-преобразователей на частоту хромосомных aberrаций в клетках костного мозга самцов крыс линии Вистар. *Электромагнитные волны и электронные системы*, т. 23, № 1, с. 12–18.

- Еськов, Е. К. (2018) Статическое электричество в пространственной ориентации и сигнализации медоносной пчелы. *Биофизика*, т. 63, вып. 3, с. 561–566.
- Копыльцов, А. В., Серов, И. Н., Лукьянов, Г. Н. (2007) Математическое моделирование взаимодействия электромагнитного излучения с кремниевой самоаффинной поверхностью. *Вестник ИНЖЭКОНа. Серия: Технические науки*, т. 19, № 6, с. 199–205.
- Леднев, В. В., Белова, Н. А., Ермаков, А. М. и др. (2008) Регуляция variability сердечного ритма человека с помощью крайне слабых переменных магнитных полей. *Биофизика*, т. 53, вып. 6, с. 1129–1137.
- Лопатина, Н. Г., Зачепило, Т. Г., Дюжикова, Н. А., Серов, И. Н. (2017) Влияние электромагнитного излучения на ассоциативное обучение медоносной пчелы *Apis mellifera* L. В кн.: А. В. Баркалов (ред.). *Материалы XV Съезда Русского энтомологического общества*. Новосибирск: Гарамонд, с. 297–298.
- Лопатина, Н. Г., Зачепило, Т. Г., Камышев, Н. Г. (2018) Опасны ли электромагнитные излучения для пчел? *Пчеловодство*, № 8, с. 12–15.
- Лопатина, Н. Г., Зачепило, Т. Г., Камышев, Н. Г. и др. (2019) Влияние неионизирующего электромагнитного излучения на поведение медоносной пчелы *Apis mellifera* L. (Hymenoptera, Apidae). *Энтомологическое обозрение*, т. 98, № 1, с. 35–43. DOI: 10.1134/S0367144519010039
- Никитина, Е. А., Медведева, А. В., Герасименко, М. С. и др. (2017) Ослабленное магнитное поле Земли: влияние на транскрипционную активность генома, обучение и память у *D. melanogaster*. *Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова*, т. 67, № 2, с. 246–256. DOI: 10.7868/S0044467717020101
- Никитина, Е. А., Медведева, А., Долгая, Ю. Ф. и др. (2013) Особенности пространственной организации хроматина у полиморфных вариантов локуса *agnostic* дрозофилы — модели геномных заболеваний человека. В кн.: *Здоровье — основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. Т. 8. Труды VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 21–23 ноября 2013 г. Ч. 2*. СПб.: б. и., с. 977–982.
- Серов, И. Н., Копыльцов, А. В., Лукьянов, Г. Н. (2006) Взаимодействие полупроводниковой пластины с самоаффинным рельефом поверхности с электромагнитным излучением. *Нанотехника*, № 4 (8), с. 44–49.
- Холодов, Ю. А., Лебедева, Н. Н. (1992) *Реакции нервной системы человека на электромагнитные поля*. М.: Наука, 135 с.
- Bernard, O. (2007) Lim kinases, regulators of actin dynamics. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, vol. 39, no. 6, pp. 1071–1076. PMID: 17188549. DOI: 10.1016/j.biocel.2006.11.011
- Bitterman, M. E., Menzel, R., Fietz, A., Schäfer, S. (1983) Classical conditioning of proboscis extension in honeybees (*Apis mellifera*). *Journal of Comparative Psychology*, vol. 97, no. 2, pp. 107–119. PMID: 6872507.
- Cammaerts, M.-C., De Doncker, P., Patris, X. et al. (2012) GSM 900 MHz radiation inhibits ants' association between food sites and encountered cues. *Electromagnetic Biology and Medicine*, vol. 31, no. 2, pp. 151–165. PMID: 22268919. DOI: 10.3109/15368378.2011.624661
- Cook, C. M., Saucier, D. M., Thomas, A., Prato, F. (2006) Exposure to ELF magnetic and ELF-modulated radiofrequency fields: The time course of physiological and cognitive effects observed in recent studies (2001–2005). *Bioelectromagnetics*, vol. 27, no. 8, pp. 613–627. PMID: 16724317. DOI: 10.1002/bem.20247
- Cucurachi, S., Tamis, W. L., Vijver, M. G. et al. (2013) A review of the ecological effects of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF). *Environment International*, vol. 51, pp. 116–140. PMID: 23261519. DOI: 10.1016/j.envint.2012.10.009
- Greggers, U., Koch, G., Schmidt, V. et al. (2013) Reception and learning of electric fields in bees. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 280, no. 1759, article 20130528. PMID: 23536603. DOI: 10.1098/rspb.2013.0528
- El Halabi, N., Achkar, R., Haidar, G. A. (2013) The effect of cell phone radiations on the life cycle of honeybees. In: *Eurocon 2013*. S. l.: IEEE, pp. 529–536. DOI: 10.1109/EUROCON.2013.6625032
- Jasaitis, D., Vasiliauskienė, V., Miškinis, P. et al. (2018) Investigation of the circle fractal structure interaction with gigahertz frequency electromagnetic waves. In: L. T. Kóczy, D. Žostautienė, O. Strikuliene, E. Zacharovienė (eds.). *Proceedings of the 12th International Scientific Conference Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018). April 26–27, 2018. Panevėžys, Lithuania*. Bologna: Editografica, pp. 81–87.
- Kumar, N. R., Sangwan, S., Badotra, P. (2011) Exposure to cell phone radiations produces biochemical changes in worker honey bees. *Toxicology International*, vol. 18, no. 1, pp. 70–72. PMID: 21430927. DOI: 10.4103/0971-6580.75869
- Lisman, J. (2017) Glutamatergic synapses are structurally and biochemically complex because of multiple plasticity processes: Long-term potentiation, long-term depression, short-term potentiation and scaling. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, vol. 372, no. 1715, article 20160260. PMID: 28093558. DOI: 10.1098/rstb.2016.0260
- Manta, A. K., Papadopoulou, D., Polyzos, A. P. et al. (2017) Mobile-phone radiation-induced perturbation of gene-expression profiling, redox equilibrium and sporadic-apoptosis control in the ovary of *Drosophila melanogaster*. *Fly*, vol. 11, no. 2, pp. 75–95. DOI: 10.1080/19336934.2016.1270487

- Menzel, R. (1999) Memory dynamics in the honeybee. *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 185, no. 4, pp. 323–340. DOI: 10.1007/s003590050392
- Saliev, T., Begimbetova, D., Masoud, A.-R., Matkarimov, B. (2018) Biological effects of non-ionizing electromagnetic fields: Two sides of a coin. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, vol. 141, pp. 25–36. PMID: 30030071. DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2018.07.009
- Sheppard, D. M. W., Li, J., Henbest, K. B. et al. (2017) Millitesla magnetic field effects on the photocycle of an animal cryptochrome. *Scientific Reports*, vol. 7, article 42228. PMID: 28176875. DOI: 10.1038/srep42228
- Shepherd, S., Lima, M. A. P., Oliveira, E. E. et al. (2018) Extremely low frequency electromagnetic fields impair the cognitive and motor abilities of honey bees. *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, article 7932. PMID: 29785039. DOI: 10.1038/s41598-018-26185-y
- Shepherd, S., Hollands, G., Godley, V. C. et al. (2019) Increased aggression and reduced aversive learning in honey bees exposed to extremely low frequency electromagnetic fields. *PLoS One*, vol. 14, no. 10, article e0223614. DOI: 10.1371/journal.pone.0223614
- Thielens, A., Bell, D., Mortimore, D. B. et al. (2018) Exposure of insects to radio-frequency electromagnetic fields from 2 to 120 GHz. *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, article 3924. PMID: 29500425. DOI: 10.1038/s41598-018-22271-3
- Válková, T., Vácha, M. (2012) How do honeybees use their magnetic compass? Can they see the North? *Bulletin of Entomological Research*, vol. 102, no. 4, pp. 461–467. PMID: 22313997. DOI: 10.1017/S0007485311000824
- van Rongen, E., Croft, R., Juutilainen, J. et al. (2009) Effects of radiofrequency electromagnetic fields on the human nervous system. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, vol. 12, no. 8, pp. 572–597. PMID: 20183535. DOI: 10.1080/10937400903458940
- Wyszkowska, J., Shepherd, S., Sharkh, S. et al. (2016) Exposure to extremely low frequency electromagnetic fields alters the behaviour, physiology and stress protein levels of desert locusts. *Scientific Reports*, vol. 6, article 36413. PMID: 27808167. DOI: 10.1038/srep42228
- Zhang, Z.-Y., Zhang, J., Yang, C.-J. et al. (2016) Coupling mechanism of electromagnetic field and thermal stress on *Drosophila melanogaster*. *PLoS One*, vol. 11, no. 9, article e0162675. PMID: 27611438. DOI: 10.1371/journal.pone.0162675

References

- Bernard, O. (2007) Lim kinases, regulators of actin dynamics. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, vol. 39, no. 6, pp. 1071–1076. PMID: 17188549. DOI: 10.1016/j.biocel.2006.11.011 (In English)
- Bitterman, M. E., Menzel, R., Fietz, A., Schäfer, S. (1983) Classical conditioning of proboscis extension in honeybees (*Apis mellifera*). *Journal of Comparative Psychology*, vol. 97, no. 2, pp. 107–119. PMID: 6872507. (In English)
- Buchachenko, A. L. (2014) Magnito-zavisimye molekulyarnye i khimicheskie protsessy v biokhimii, genetike i meditsine [Magnetic field-dependent molecular and chemical processes in biochemistry, genetics and medicine]. *Uspekhi khimii*, vol. 83, no. 1, pp. 1–12. (In Russian)
- Cammaerts, M.-C., De Doncker, P., Patris, X. et al. (2012) GSM 900 MHz radiation inhibits ants' association between food sites and encountered cues. *Electromagnetic Biology and Medicine*, vol. 31, no. 2, pp. 151–165. PMID: 22268919. DOI: 10.3109/15368378.2011.624661 (In English)
- Cook, C. M., Saucier, D. M., Thomas, A., Prato, F. (2006) Exposure to ELF magnetic and ELF-modulated radiofrequency fields: The time course of physiological and cognitive effects observed in recent studies (2001–2005). *Bioelectromagnetics*, vol. 27, no. 8, pp. 613–627. PMID: 16724317. DOI: 10.1002/bem.20247 (In English)
- Cucurachi, S., Tamis, W. L., Vijver, M. G. et al. (2013) A review of the ecological effects of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF). *Environment International*, vol. 51, pp. 116–140. PMID: 23261519. DOI: 10.1016/j.envint.2012.10.009 (In English)
- Dyuzhikova, N. A., Kopyltsov, A. V., Korshunov, K. A. et al. (2018) Dejstvie elektromagnitnogo izlucheniya vysokoj chastoty i vliyanie rezonatorov-preobrazovatelej na chastotu khromosomnykh aberratsij v kletkakh kostnogo mozga samtsov krysv linii Wistar [The effect of high-frequency electromagnetic radiation and the effect of resonator-convertors on the frequency of chromosomal aberrations in the bone marrow cells of male Wistar rats]. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy — Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, vol. 23, no. 1, pp. 12–18. (In Russian)
- El Halabi, N., Achkar, R., Haidar, G. A. (2013) The effect of cell phone radiations on the life cycle of honeybees. In: *Eurocon 2013*. S. l.: IEEE, pp. 529–536. DOI: 10.1109/EUROCON.2013.6625032 (In English)
- Eskov, E. K. (2018) Statcheskoe elektrichestvo v prostranstvennoj orientatsii i signalizatsii medonosnoj pchely [Static electricity in the spatial orientation and signaling of honey bees]. *Biofizika — Biophysics*, vol. 63, no. 3, pp. 561–566. (In Russian)
- Greggers, U., Koch, G., Schmidt, V. et al. (2013) Reception and learning of electric fields in bees. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 280, no. 1759, article 20130528. PMID: 23536603. DOI: 10.1098/rspb.2013.0528 (In English)

- Jasaitis, D., Vasiliauskienė, V., Miškinis, P. et al. (2018) Investigation of the circle fractal structure interaction with gigahertz frequency electromagnetic waves. In: L. T. Kóczy, D. Žostautienė, O. Strikalienė, E. Zacharovienė (eds.). *Proceedings of the 12th International Scientific Conference Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018)*. April 26–27, 2018. Panevėžys, Lithuania. Bologna: Editografica, pp. 81–87. (In English)
- Kholodov, Yu. A., Lebedeva, N. N. (1992) *Reaktsii nervnoj sistemy cheloveka na elektromagnitnye polya [Reactions of the human nervous system to electromagnetic fields]*. Moscow: Nauka Publ., 135 p. (In Russian)
- Kopyl'tsov, A. V., Serov, I. N., Luk'yanov, G. N. (2007) Matematicheskoe modelirovanie vzaimodejstviya elektromagnitnogo izlucheniya s kremnievoj samoaffinnoj poverkhnost'yu [Mathematical modeling of the interaction of a ring structured surface with high-frequency electromagnetic radiation]. *Vestnik INZhEKONa. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, vol. 19, no. 6, pp. 199–205. (In Russian)
- Kumar, N. R., Sangwan, S., Badotra, P. (2011) Exposure to cell phone radiations produces biochemical changes in worker honey bees. *Toxicology International*, vol. 18, no. 1, pp. 70–72. PMID: 21430927. DOI: 10.4103/0971-6580.75869 (In English)
- Lednev, V. V., Belova, N. A., Ermakov, A. M. et al. (2008) Regulyatsiya variabel'nosti serdechnogo ritma cheloveka s pomoshchyu krajne slabykh peremennykh magnitnykh polej [Modulation of cardiac rhythm in the humans exposed to extremely weak alternating magnetic fields]. *Biofizika — Biophysics*, vol. 53, no. 6, pp. 1129–1137. (In Russian)
- Lisman, J. (2017) Glutamatergic synapses are structurally and biochemically complex because of multiple plasticity processes: Long-term potentiation, long-term depression, short-term potentiation and scaling. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, vol. 372, no. 1715, article 20160260. PMID: 28093558. DOI: 10.1098/rstb.2016.0260 (In English)
- Lopatina, N. G., Zachepilo, T. G., Dyuzhikova, N. A., Serov, I. N. (2017) Vliyanie elektromagnitnogo izlucheniya na assotsiativnoe obuchenie medonosnoj pchely *Apis mellifera* L. [Influence of electromagnetic radiation on associative learning honey bee *Apis mellifera* L.]. In: A. V. Barkalov (ed.). *Materialy XV Sezda Russkogo entomologicheskogo obshchestva [Proceedings of XV Congress of the Russian Entomological Society]*. Novosibirsk: Garamond Publ., pp. 297–298. (In Russian)
- Lopatina, N. G., Zachepilo, T. G., Kamyshev, N. G. (2018) Opasny li elektromagnitnye izlucheniya dlya pchel? [Is electromagnetic radiation dangerous to honeybees?]. *Pchelovodstvo*, vol. 8, pp. 12–15. (In Russian)
- Lopatina, N. G., Zachepilo, T. G., Kamyshev, N. G. et al. (2019) Vliyaniye neioniziruyushchego elektromagnitnogo izlucheniya na povedeniye medonosnoy pchely *Apis mellifera* L. (Hymenoptera, Apidae) [Influence of non-ionizing electromagnetic radiation on the behavior of the honey bee *Apis mellifera* L. (Hymenoptera, Apidae)]. *Entomologicheskoye obosrenie*, vol. 98, no. 1, pp. 35–43. DOI: 10.1134/S0367144519010039 (In Russian)
- Manta, A. K., Papadopoulou, D., Polyzos, A. P. et al. (2017) Mobile-phone radiation-induced perturbation of gene-expression profiling, redox equilibrium and sporadic-apoptosis control in the ovary of *Drosophila melanogaster*. *Fly*, vol. 11, no. 2, pp. 75–95. DOI: 10.1080/19336934.2016.1270487 (In English)
- Menzel, R. (1999) Memory dynamics in the honeybee. *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 185, no. 4, pp. 323–340. DOI: 10.1007/s003590050392 (In English)
- Nikitina, E. A., Medvedeva, A. V., Gerasimenko, M. S. et al. (2017) Oslablennoe magnitnoe pole Zemli: vliyanie na transkripsionnyu aktivnost' genoma, obuchenie i pamyat' u *Dr. melanogaster* [Weakened geomagnetic field: Impact on transcriptional activity of the genome, learning and memory formation in *Dr. melanogaster*]. *Zhurnal vysshey nervnoj deyatel'nosti im. I. P. Pavlova — I. P. Pavlov Journal of Higher Nervous Activity*, vol. 67, no. 2, pp. 246–256. DOI: 10.7868/S0044467717020101 (In Russian)
- Nikitina, E. A., Medvedeva, A., Dolgaya, Yu. F. et al. (2013) Osobennosti prostranstvennoj organizatsii khromatina u polimorfnykh variantov lokusa *agnostic* drozofily — modeli genomnykh zabolevaniy cheloveka [Chromatin organization of drosophila *agnostic* locus polymorphic variants — the models of human genomic diseases]. In: *Zdorove — osnova chelovecheskogo potentsiala: problemy i puti ikh resheniya. T. 8. Trudy VIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. 21–23 noyabrya 2013 g. [Health — the base of human potential: Problems and ways to solve them. Vol. 8. Proceedings of the 8th All-Russian research and practical conference with international participation. 21–23 November]*. Pt 2. Saint Petersburg: s. n., pp. 977–982. (In Russian)
- Saliev, T., Begimbetova, D., Masoud, A.-R., Matkarimov, B. (2018) Biological effects of non-ionizing electromagnetic fields: Two sides of a coin. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, vol. 141, pp. 25–36. PMID: 30030071. DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2018.07.009 (In English)
- Serov, I. N., Kopyl'tsov, A. V., Luk'yanov, G. N. (2006) Vzaimodejstvie poluprovodnikovoy plastiny s samoaffinnyim rel'efom poverkhnosti s elektromagnitnym izlucheniem [Interaction of a semiconductor plate with a self-affine surface topography with electromagnetic radiation]. *Nanotekhnika — Nanotechnics*, no. 4 (8), pp. 44–49. (In Russian)
- Shepherd, S., Hollands, G., Godley, V. C. et al. (2019) Increased aggression and reduced aversive learning in honey bees exposed to extremely low frequency electromagnetic fields. *PLoS One*, vol. 14, no. 10, article e0223614. DOI: 10.1371/journal.pone.0223614 (In English)

- Shepherd, S., Lima, M. A. P., Oliveira, E. E. et al. (2018) Extremely low frequency electromagnetic fields impair the cognitive and motor abilities of honey bees. *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, article 7932. PMID: 29785039. DOI: 10.1038/s41598-018-26185-y (In English)
- Sheppard, D. M. W., Li, J., Henbest, K. B. et al. (2017) Millitesla magnetic field effects on the photocycle of an animal cryptochrome. *Scientific Reports*, vol. 7, article 42228. PMID: 28176875. DOI: 10.1038/srep42228 (In English)
- Thielens, A., Bell, D., Mortimore, D. B. et al. (2018) Exposure of insects to radio-frequency electromagnetic fields from 2 to 120 GHz. *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, article 3924. PMID: 29500425. DOI: 10.1038/s41598-018-22271-3 (In English)
- Válková, T., Vácha, M. (2012) How do honeybees use their magnetic compass? Can they see the North? *Bulletin of Entomological Research*, vol. 102, no. 4, pp. 461–467. PMID: 22313997. DOI: 10.1017/S0007485311000824 (In English)
- van Rongen, E., Croft, R., Juutilainen, J. et al. (2009) Effects of radiofrequency electromagnetic fields on the human nervous system. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, vol. 12, no. 8, pp. 572–597. PMID: 20183535. DOI: 10.1080/10937400903458940 (In English)
- Wyszkowska, J., Shepherd, S., Sharkh, S. et al. (2016) Exposure to extremely low frequency electromagnetic fields alters the behaviour, physiology and stress protein levels of desert locusts. *Scientific Reports*, vol. 6, article 36413. PMID: 27808167. DOI: 10.1038/srep42228 (In English)
- Zhang, Z.-Y., Zhang, J., Yang, C.-J. et al. (2016) Coupling mechanism of electromagnetic field and thermal stress on *Drosophila melanogaster*. *PLoS One*, vol. 11, no. 9, article e0162675. PMID: 27611438. DOI: 10.1371/journal.pone.0162675 (In English)