

ВОСПРИЯТИЕ И СПЕЦИФИЧНОСТЬ РЕАГИРОВАНИЯ МЕДОНОСНЫХ ПЧЕЛ, БУМАЖНЫХ ОС И РЫЖИХ ЛЕСНЫХ МУРАВЬЕВ НА НИЗКОЧАСТОТНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

© 2020 г. Е.К. Еськов

*Российский государственный аграрный заочный университет,
143900, Балашиха Московской области, ул. Ю. Фучика, 1*

E-mail: ekeskov@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.02.2019 г.

После доработки 18.02.2020 г.

Принята к публикации 19.02.2020 г.

Пчелы, осы и муравьи не имеют специализированных рецепторов восприятия электрического поля. Адекватное реагирование на природные электрические поля у пчел и муравьев связано с воздействием атмосфериков, усиливающих при приближении грозового фронта. К восприятию насекомыми низкочастотных электрических полей высокой напряженности имеют отношения первичные преобразователи механорецепторов, реагирующих на смещение. Неспецифический механизм восприятия электрических полей основан на раздражении насекомых наведенными токами, протекающими в местах их контактирования между собой и/или токопроводящими поверхностями. Частотная характеристика чувствительности к электрическому полю определяется в основном величиной наводимого им тока и интенсивностью его контактного действия. Величина тока, наводимого в покровах тела насекомых, нелинейно связана с частотой электрического поля. Область с наибольшей чувствительностью к электрическим полям приходится примерно на 500 Гц, что согласуется с максимальной величиной наводимого тока. При этом порог чувствительности к электрическому полю у ос составляет около 0.04, у пчел – 0.45 кВ/м. Муравьи реагируют замедлением локомоций на действие электрического поля напряженностью 7–10 кВ/м. Магнитные поля и ионизация, сопутствующие генерации электрического поля, напряженность которого достигает 15–20 кВ/м, не стимулируют изменения поведения насекомых.

Ключевые слова: пчелы, осы, муравьи, электрическое поле, чувствительность, аномалии поведения, адекватное реагирование.

DOI: 10.31857/S0006302920030175

Биосфера Земли подвергается природным электромагнитным воздействиям широкого частотного диапазона – от медленных изменений магнитного и электрических полей до гамма-излучений. Природные электромагнитные процессы дополняются возрастающими по диапазону и интенсивности антропогенными воздействиями на биосферу. Антропогенные электрические (ЭП) и магнитные поля (МП) по интенсивности сравнимы с естественными ЭП и МП, а в некоторых ситуациях превосходят их.

У животных ЭП и МП воздействуют на электрические процессы, протекающие в клетках, тканях и органах. Поэтому природные и антропогенные ЭП и МП, независимо от наличия или отсутствия у животных специализированных ре-

цепторов ЭП, влияют на их физиологическое состояние [1–6].

В зависимости от образа жизни и уровня организации животные по-разному реагируют на ЭП, защищаясь от их неблагоприятного воздействия. Высокоорганизованные социальные насекомые от различных экстремальных воздействий защищаются обычно скоординированными усилиями больших групп или всех взрослых особей семьи. На типичные физические или биотические стимулы у социальных насекомых прослеживается адекватное реагирование. Так, на изменения внешней температуры пчелы и осы, находящиеся в своих гнездах, реагируют изменением генерации и выделения тепла [7–10]. Рыжие лесные муравьи изменяют наклон поверхности холмика к солнечным лучам [9, 11, 12]. Коллективные оборонительные реакции стимулирует у всех социальных насекомых нападение на их жилища врагов и грабителей. При приближении грозового

Сокращения: ЭП – электрические поля, МП – магнитные поля, ЛЭП – линия электропередачи.

фронта, чему сопутствует возрастание интенсивности атмосфериков [12], муравьи заделывают входные отверстия муравейников, а пчелы прекращают полеты и возвращаются в ульи [9–12].

Медоносные пчелы наряду с защитными реакциями на переменные ЭП приспособились использовать электростатическое поле в системе внутриульевых коммуникаций. Статическое поле, возникающее на теле пчелы-сигнальщицы при трении о поверхность сот, используется мобилизуемыми ею пчелами. Они среди множества других пчел, находящихся на сотах, по отклонению антенн под действием статического заряда обнаруживают сигнальщицу и поддерживают с нею дистанцию, необходимую для восприятия относительно слабого акустического сигнала. Посредством этого сигнала пчелы-сигнальщица информирует приближившихся к ней пчел о расстоянии до обнаруженной цели полета, например источника корма или воды [14].

Что касается антропогенных ЭП и МП, то они для насекомых и других видов животных являются новыми, нетипичными факторами среды. На них высокоорганизованные животные с большой продолжительностью жизни не могли приобрести адекватных форм реагирования.

Настоящей работой предпринят сравнительный анализ реагирования на ЭП трех видов перепончатокрылых насекомых (Hymenoptera), различающихся по образу жизни, — медоносных пчел, бумажных ос и рыжих лесных муравьев. Эти виды социальных насекомых, приспособленные к разным условиям жизни, сооружают свои гнезда из материалов, различающихся по электропроводности. Основу гнездовых построек у пчел представляют восковые, а у ос — бумажные соты. Муравьи сооружают гнезда в земле, возводя земляные холмики, включающие растительные частички.

Изучение специфики реагирования пчел, ос и муравьев на низкочастотное ЭП важно для понимания физиологических механизмов восприятия этого стимула животными, отличающимися по образу жизни и экологической валентности. У медоносных пчел семья, а не особь, представляет собою размножающуюся биологическую единицу, подлежащую действию естественного отбора. Бумажные осы живут сезонными семьями, которые размножаются половозрелыми самками. Рыжие лесные муравьи, образуя большие семьи, могут размножаться почкованием или половозрелыми особями.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЯМ

Для пчел (*Apis mellifera* L.) установлены групповые эффекты реагирования ЭП [10, 15, 16]. В

частности, одна пчела, находящаяся на изолированной поверхности, независимо от ориентации тела по отношению к силовым линиям ЭП не проявляет никаких признаков реагирования на низкочастотное ЭП высокой напряженности, достигающей 50 кВ/м. Незначительная активизация локомоций и соответственно увеличение потребления O_2 происходит под действием ЭП напряженностью 100 кВ/м.

Соответственно при увеличении численности пчел, поддерживающих между собой тактильные контакты, степень их реагирования на ЭП одинаковой частоты и напряженности возрастает. У двух пчел, находящихся на электрически изолированной поверхности (в стеклянном сосуде), ЭП частотой 500 Гц при напряженности 50 кВ/м стимулирует активизацию и увеличение потребления O_2 в 1.5 ± 0.14 раза, а у десяти пчел — в 1.8 ± 0.17 раза. Резкую активизацию у 100 пчел стимулирует ЭП напряженностью 14 ± 3 кВ/м.

Частотная характеристика чувствительности пчел к ЭП установлена на их семьях [10, 17, 18]. Семьи, содержавшие от 5 до 30 тыс. взрослых рабочих особей, находились в экранированной акустически изолированной камере. Применение акустической изоляции пчелиных семей требовалось для точной регистрации изменений звукового шума семьи, регистрируемого в диапазоне 400–500 Гц. С усилением этого частотного диапазона шумов пчелиной семьи связана активизация пчел [19]. Таким же способом на семьях земляных ос (*Paravespula vulgaris* L.), содержавших от 1200 до 2000 взрослых особей, изучали их чувствительность к ЭП.

Пчелы и осы, находящиеся в своих гнездах, обладают максимальной чувствительностью к ЭП частотой 500 ± 50 Гц. Но семьи ос, отличаясь от пчел меньшей численностью взрослых особей, примерно на порядок превышают пчелиные семьи по чувствительности к ЭП. На частоте около 500 Гц порог чувствительности ос находится на уровне 0.03–0.05 кВ/м (рис. 1б), а у пчел — 0.4–0.5 кВ/м (рис. 1а).

Чувствительность к ЭП неравномерно изменяется в ответ на понижение или повышение его частоты. И у ос, и у пчел при уменьшении частоты ЭП в 50 раз (от 500 до 10 Гц) порог чувствительности к этому стимулу возрастает примерно в два раза. При повышении частоты ЭП в десять раз (от 500 до 5000 Гц) порог чувствительности у ос возрастает в четыре раза, а у пчел — в двенадцать раз (рис. 1а,б).

Рыжие лесные муравьи (*Formica rufa* L.) характеризуются относительно низкой чувствительностью к ЭП. Если порог чувствительности определять по понижению локомоторной активности, то некоторое ее замедление у муравьев, выходящих из муравейника, наблюдается под действием

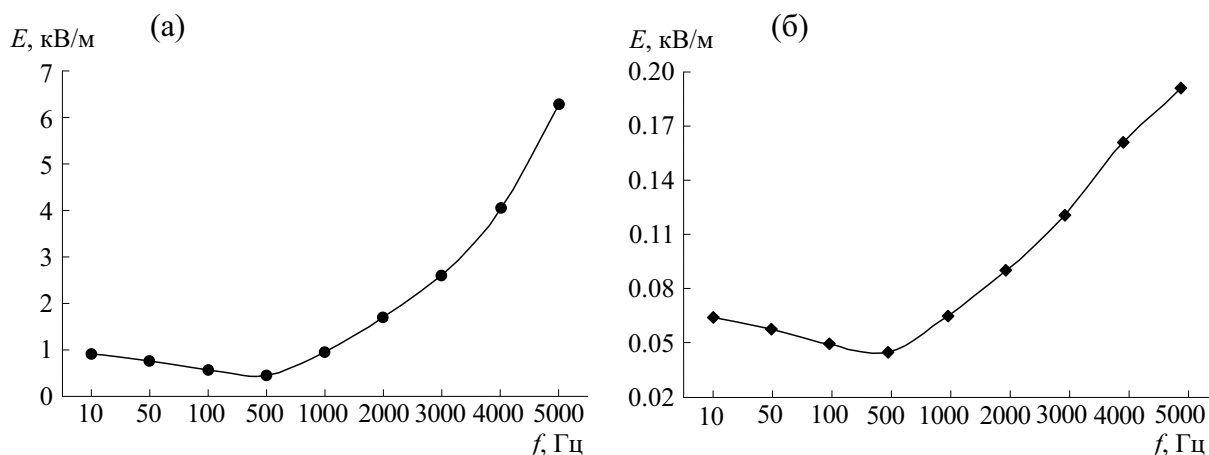


Рис. 1. Частотная зависимость чувствительности медоносных пчел (а) и бумажных ос (б) к электрическому полю (по работе [17], с изменениями).

ЭП частотой 500 Гц при напряженности, достигающей 8–10 кВ/м [20].

РЕАГИРОВАНИЕ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ

Находясь в разных условиях жизни и обладая разной чувствительностью к низкочастотному ЭП, пчелы, осы и муравьи по-разному реагируют на этот стимул. Поскольку порог чувствительности этих насекомых к ЭП приходится примерно на 500 Гц, то эта частота использована для стимуляции ответных реакций.

Пчелы. Пчелы, находящиеся в гнезде, реагируют на ЭП повышением локомоций и активности метаболизма [21]. Заметную активизацию локомоций стимулирует ЭП напряженностью 1–2 кВ/м. Возбужденные пчелы начинают выходить из улья, когда напряженность ЭП достигает 10–15 кВ/м, а при 20–30 кВ/м сотни возбужденных пчел выходят на переднюю стенку улья. Некоторая их часть взлетает и кружится на расстоянии 1–5 м от улья. Легающие пчелы набрасываются и жалят людей и животных, оказавшихся вблизи улья.

Через 4–7 мин от начала воздействия на пчелиную семью ЭП напряженностью 20–30 кВ/м локомоторная активность пчел начинает понижаться. С этого времени ранее гиперактивные пчелы группируются на поверхности сот, образуя неровные ряды, ориентированные преимущественно вдоль или под небольшим углом к силовым линиям ЭП. В нижней части сот и у дна улья пчелы образуют беспорядочные малоподвижные скопления.

Поведение пчел, находящихся у летка во время действия ЭП, сходно с поведением сторожей при нападении на семью врагов или грабителей. Но в отличие от сторожей эти пчелы отличаются по-

вышенной двигательной активностью. Они приближаются и вступают в кратковременные тактильные контакты не только с подлетающими пчелами, что характерно для сторожей, но и с особями, выходящими из улья. Тактильным контактам всегда сопутствует повышение локомоторной активности пчел.

На пороговые и близкие к ним напряженности ЭП пчелиная семья реагирует незначительным повышением интенсивности спектральных составляющих в диапазоне 400–500 Гц. Этот диапазон акустического шума пчелиной семьи связан с активизацией пчел [19]. Всего на 0.5–0.9 дБ возрастает интенсивность спектральных составляющих пчелиного шума в диапазоне 450 ± 50 Гц под действием ЭП напряженностью 1.5–2 кВ/м. При увеличении напряженности ЭП до 5 и 10 кВ/м интенсивность этих составляющих возрастает соответственно на 1.7–1.8 и 2.1–2.3 дБ (рис. 2а).

При высокой напряженности ЭП, достигающей 35 ± 3 кВ/м, сильному возбуждению пчел сопутствует значительное изменение интенсивности и спектральной структуры акустического шума пчелиной семьи. Частота пика интенсивности, локализуемого в области 400–500 Гц, повышается на 25–35 Гц, а общая интенсивность шума возрастает на 4–5 дБ. К исходному состоянию интенсивность и спектральная структура пчелиных звуков возвращаются через 3.6–4.2 ч после отключения ЭП [10, 19].

Активизации локомоций под действием ЭП сопутствует повышение температуры и выделения CO_2 (рис 2б,в). Незначительное повышение температуры (на 0.1–0.3°C) и CO_2 (на 0.05–0.1%) над центром расплодной зоны гнезда происходит под действием ЭП напряженностью 1.5–2 кВ/м. При повышении напряженности ЭП до 5 кВ/м температура и концентрация CO_2 в указанной зо-

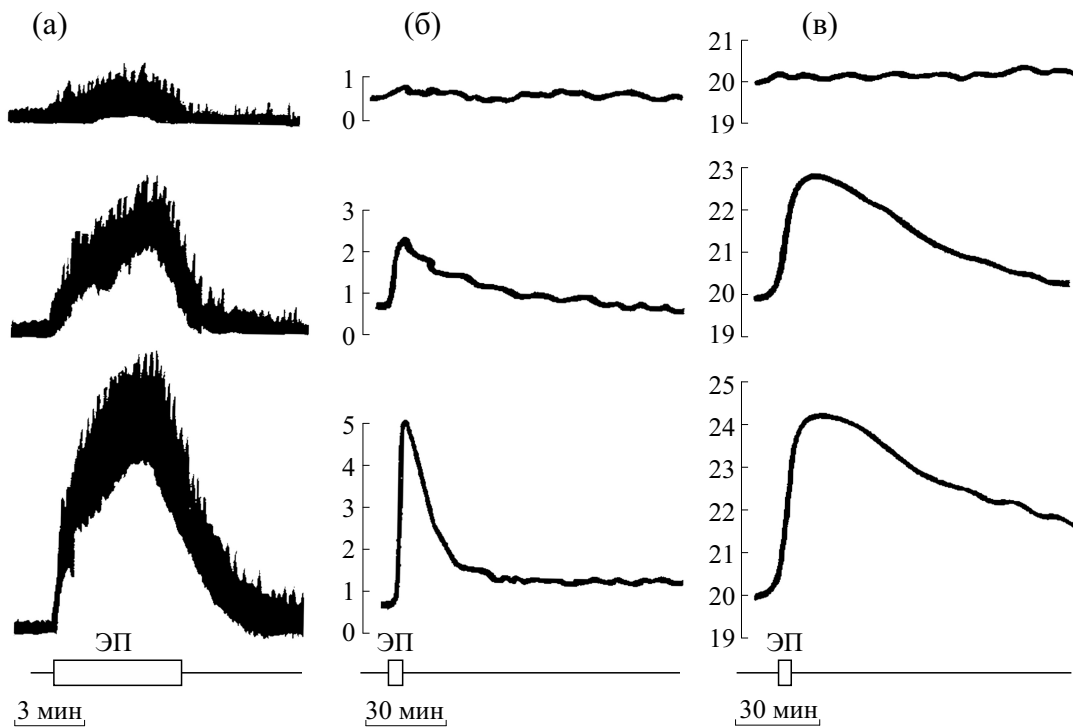


Рис. 2. Изменение интенсивности звуков, генерируемых пчелиной семьей в полосе 400–500 Гц (а), концентрации CO_2 в центре гнезда (б) и температуры над гнездом (в) под действием ЭП частотой 500 Гц при его напряженности 1.5–2 кВ/м (верхний ряд), 5 кВ/м (средний ряд) и 10 кВ/м (нижний ряд); ЭП – периоды действия поля [21].

не гнезда возрастает на 2.6–2.8°C и 1.6–1.8%, а при 10 кВ/м – соответственно на 4.1–4.3°C и 3.7–4.1%.

Значительные изменения микроклимата в пчелином гнезде происходят под действием ЭП напряженностью 20–25 кВ/м. На 10-минутное воздействие такого стимула температура в центре гнезда повышается на 7–9°C, а концентрация CO_2 – на 4.4–6.1%. Через 2–3 ч после отключения поля температура снижается всего на 0.5–1.3°C и возвращается к исходному значению через 15–18 ч. Но концентрация CO_2 нормализуется всего за 50–70 мин.

Эффективность ЭП зависит от его генерации в форме пакетов импульсов или непрерывных синусоидальных колебаний. При подаче ЭП в импульсном режиме имеет значение скважность импульсации. В частности, ЭП частотой 300 Гц при напряженности 8 кВ/м, подаваемое в форме синусоидальных колебаний в течение 10 мин, стимулирует повышение температуры над гнездом пчелиной семьи на $2.1 \pm 0.4^\circ\text{C}$. За такое же время ЭП, подаваемое в форме импульсов длительностью 30 мс со скважностью, равной 2, стимулирует повышение пчелами температуры на $1.2 \pm 0.2^\circ\text{C}$, а при скважности, равной 10, – на $0.4 \pm 0.1^\circ\text{C}$ [21, 22].

Длительное действие ЭП не вызывает у пчел полного привыкания, хотя активность реагирования со временем уменьшается [10, 23]. Действие ЭП, напряженность которого примерно на порядок превосходит пороговое значение чувствительности, дестабилизирует внутригнездовую температуру. Например, у пчелиных семей, которые в течение 45 суток находились под крайней фазой линии электропередачи (ЛЭП) напряжением 500 кВ при напряженности ЭП около 7.5 кВ/м, температура в разных зонах гнезда скачкообразно повышалась на 2–4°C, а затем опускалась до исходных значений. Периоды подъема и понижения температуры не имели строгой упорядоченности. Продолжительность той и другой фаз находилась в пределах от нескольких минут до десятков часов.

ЭП ЛЭП влияет также на дестабилизацию концентрации CO_2 в разных зонах пчелиного гнезда. В дни, благоприятные для полетов, концентрация CO_2 в центральной части гнезда в течение ночи повышалась в среднем до $1.8 \pm 0.4\%$, а в прилетковой зоне – до $1.1 \pm 0.3\%$. К середине дня в центральной части гнезда происходило понижение концентрации CO_2 примерно в два раза, а в прилетковой – повышение в полтора раза. В то же самое время в гнездах семей, находившихся в 20–50 м от линии, суточные колебания температуры не выходили за пределы 0.23–0.37% [23].

К специфическим реакциям пчел на длительное воздействие ЭП относится интенсивное покрытие воском и прополисом леткового прохода и примыкающих к нему частей улья. Такое поведение свойственно пчелам в конце лета – начале осени при подготовке к зимовке. Но в прилетковой зоне ульев, находившиеся в 10–14 м от крайней фазы ЛЭП и под нею, к концу лета пчелы накопили соответственно по 11 ± 1.3 и 37 ± 4.6 г воско-прополисовой смеси. В ульях семей, находившихся в это время в 50–60 м от ЛЭП, масса накопленной воско-прополисовой смеси составляла всего 0.9 ± 0.3 г [24]. Иногда пчелы семей, находящихся под ЛЭП, полностью заделывают прополисом летковые проходы, обрекая тем самым себя на гибель [25].

ЭП ЛЭП влияет на поведение пчел, вылетающих из ульев [23]. Им свойственна повышенная агрессивность и неупорядоченность вылетов большими группами, которые кружатся некоторое время на расстоянии нескольких метров от ульев. Вылеты этих пчел не связаны и не имеют сходства с ориентировочными и очистительными облетами, а полеты пчел-фуражиров отличаются пониженной продуктивностью. Так, если у фуражиров, возвращающихся в ульи, которые находились в 50–60 м от ЛЭП, масса содержимого медовых зобиков составляла 28.8 ± 3.9 мг, то под крайней фазой линии она была меньше примерно в полтора раза.

Пчелы, находящиеся у источника кома, покидают его под действием ЭП. Группы из 50–120 пчел, наполняющие медовые зобики 50–60%-м раствором сахарозы, под действием ЭП напряженностью 40–50 кВ/м взлетают в течение 3–10 с. Летающие пчелы кружатся между электродами и за их пределами, не проявляя признаков агрессии. После отключения ЭП пчелы в течение 0.5–1.5 мин вновь собираются на кормушке [10].

Поведение пчел у кормушки не меняется при десяти кратных включениях ЭП с 5-, 20- и 30-минутными интервалами. При длительном однократном включении ЭП пчелы, покругившись над кормушкой в течение трех-пяти минут, начинают возвращаться на нее и наполнять зобики. Этим пчел возбуждают взаимные соприкосновения и стимулируют взлеты. Но покругившись некоторое время, пчелы вновь возвращаются на кормушку.

На действие ЭП у пчел-фуражиров быстро вырабатывается отрицательный условный рефлекс. При наличии двух кормушек, расположенных на расстоянии 1 м, пчелы быстро начинают отличать кормушку, которая находится в ЭП. Для выработки отрицательного рефлекса достаточно 8–14 включений ЭП. После этого все пчелы, которым известно место подкормки, начинают игно-

рировать кормушку, подвергаемую действию ЭП, и собираются на соседней кормушке.

Осы. У ос, находящихся в гнезде, резкое повышение двигательной активности стимулирует ЭП напряженностью 1–2 кВ/м. Возбуждение взрослых особей происходит в процессе тактильных контактов. Повышение локомоций приводит к повышению внутригнездовой температуры на $0.6–0.9^\circ\text{C}$ [18].

В отличие от пчел, у ос увеличение напряженности ЭП не приводит к повышению внутригнездовой температуры, потому что активизировавшиеся осы вылетают из гнезда. Под действием ЭП напряженностью 6–8 кВ/м все взрослые осы покидают гнездо в течение одной-трех минут. Поэтому температура в гнезде понижается.

Осы, вылетающие из гнезда, кружатся у его леткового входа. Летающие осы не проявляют признаков агрессии. После отключения ЭП осы в течение двух-трех минут возвращаются в гнездо. Многократные повторные включения ЭП стимулируют стереотипные реакции ос без выраженных признаков адаптации.

Муравьи. Обнаружено специфическое реагирование муравьев на ЭП частотой от 50 до 500 Гц при размещении одного из электродов (металлической пластины размером 40×40 см) над муравейником параллельно поверхности почвы и заглиблению в почву на 40 см второго электрода [20]. В зависимости от напряженности ЭП поведение муравьев существенно изменяется. В частности, через 7–10 с после включения ЭП напряженностью 7–10 кВ/м происходит замедление локомоций муравьев, находившихся на поверхности муравейника. В дальнейшем некоторое повышение активности муравьев, выражающееся в нормализации их поведения, происходит через 15–20 мин после выключения ЭП.

Под действием ЭП напряженностью 9–11 кВ/м муравьи, вышедшие из муравейника, замедляют движение. Это сходно с поведением пчел, оказавшихся на поверхности металлической пластины, подключенной к конденсатору, заряженному от постоянного источника тока напряжением 300 В [18]. Но, в отличие от пчел, муравьи, медленно передвигаясь к вершине холмика, останавливаются и принимают динамические позы угрозы – переворачиваются на спинку и поднимают вверх брюшко. Такую позу муравьи удерживают в течение одной-трех минут, а затем продолжают движение к вершине холмика.

Повышение напряженности ЭП до 24–26 кВ/м активизирует у муравьев оборонительные реакции. Муравьи собираются на вершине муравейника, поднимают вверх брюшко и выбрызгивают струйки кислотного секрета, что используется обычно для защиты от нападения врагов. Но эта типичная защитная реакция при

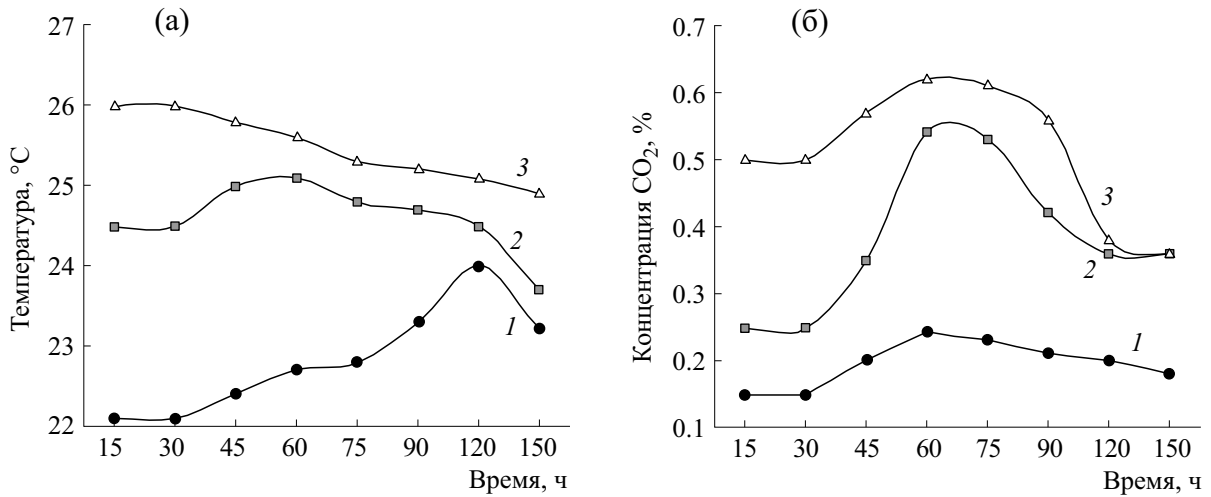


Рис. 3. Изменение температуры (а) и концентрации CO₂ (б) на глубине 10 (кривая 1), 20 (кривая 2) и 40 мм (кривая 3) от вершины муравейника на ЭП напряженностью 10 кВ/м, включенного с 30-й по 60-ю минуту (по работе [20], с изменениями).

воздействию ЭП дополняется взаимной агрессивностью муравьев, приводящей к гибели части из них. За 15 мин действия ЭП погибало около 3% особей, собиравшихся на вершине муравейника. Этого не наблюдается при разорении муравейника, активизирующего защитные реакции муравьев.

В муравейнике под действие ЭП происходит изменение температуры и содержания CO₂ (рис. 3). При температуре внешнего воздуха и поверхности муравейника в пределах 19–23°C под влиянием тридцатиминутного воздействия ЭП напряженностью 10 кВ/м температура в средней части холмика повышается в среднем на $1 \pm 0.15^\circ\text{C}$, в верхней – на $0.5 \pm 0.09^\circ\text{C}$, а в нижней – опускается на $0.3 \pm 0.06^\circ\text{C}$. В течение 15 мин после отключения ЭП температура в верхней части холмика понижается на $0.2 \pm 0.07^\circ\text{C}$, в средней – на $0.8 \pm 0.14^\circ\text{C}$ и в нижней – на $0.7 \pm 0.12^\circ\text{C}$. В последующие 30–45 мин активному передвижению муравьев в глубь муравейника и из него на поверхность холмика сопутствуют периоды повышения, а затем понижения температуры (рис. 3а).

Динамике температуры в муравейнике под действие ЭП сопутствует изменение концентрации CO₂ (рис. 3б). За 30 мин действия ЭП содержание CO₂ в верхней и средней частях холмика возрастает примерно в два раза. После отключения ЭП концентрация CO₂ возвращается к исходному уровню через 40–60 мин. В нижней части холмика в период действия ЭП содержание CO₂ возрастает в среднем в 1.2 раза, а через 40–50 мин после отключения поля уменьшается в 1.6 раза.

Сходные изменения температуры и содержания CO₂ в муравейнике происходили под действием ЭП напряженностью 25 кВ/м. Эти изменения происходят примерно в таких же пределах, как при воздействии ЭП напряженностью 10 кВ/м, но с большей скоростью, что обуславливалось активизацией локомотий.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, СОПУТСТВУЮЩИЕ ГЕНЕРАЦИИ ЭП

К процессам, сопутствующим генерации ЭП, относится возникновение магнитного поля (МП) и увеличение концентрации аэроионов. Возможны также вибрации опорных субстратов (стенок ульев, сотов и др.), на которых находятся пчелы. По некоторым сведениям пчелы, изолированные от семьи, предпочитают локализоваться в области повышенного магнитного потока [26]. Порог чувствительности пчел к МП находится на уровне 260 мТл [27]. Имеются сведения, согласно которым, отрицательные аэроионы влияют на повышение двигательной активности пчел [28,29].

Магнитное поле. Величина магнитного поля, сопутствующего действию ЭП, определяется вы-

ражением $B = \frac{\pi f r}{C^2} E \sin(2\pi f t)$, где r – расстояние до прямой, проходящей через центры электродов (металлические пластины, размером 40×40 см); f – частота ЭП; E – его напряженность; C – скорость света; t – время [30]. Отсюда при воздействии на семью ЭП частотой 500 Гц и напряженностью 15 кВ/м величина МП составляет около $1.3 \cdot 10^{-10}$ Тл, или $1.3 \cdot 10^{-6}$ Гс. МП Земли на средних широтах приближается к 0.5 Гс, а его суточные вариации достигают 10^{-3} Гс [31], что пример-

но на три порядка превышает МП, возникающее при генерации ЭП напряженностью 15 кВ/м.

На суточные вариации МП Земли реагируют пчелы-сигнальщицы (танцовщицы). Они в течение дня «ошибаются» в указании направления на указываемую цель полета, отклоняя от нее до 30–35° направление прямолинейного пробега. Роль влияния вариаций МП на «ошибки» пчел-сигнальщиц доказана тем, что в случае компенсации МП Земли до 0–5% угол максимального отклонения направления от реального уменьшается в среднем в 3.4 раза [32].

Но на МП, соответствующие пороговым значениям чувствительности пчел и ос, эти насекомые не реагируют. Не обнаружено, чтобы пчелы, содержащиеся по 200 особей в стеклянных цилиндрах, помещаемых в соленоид, реагировали на МП частотой 50–1000 Гц, индукция которого достигала 10 Гс [33]. Это на 10^7 или 10^8 превосходило индукцию МП, которая сопутствует генерации ЭП, стимулирующей активное реагирование пчел или ос.

Ионизация. При воздействии на пчелиную семью ЭП напряженностью 15 кВ/м в течение 15 мин концентрация легких, средних и тяжелых ионов с подвижностью свыше 0.001 см/(В с) не превышает $5 \cdot 10^3/\text{см}^3$ (измерение проведено счетчиком аэроионов ИТ-8401).

Судя по внутригнездовой температуре, интенсивности и спектральной структуре звуков, генерируемых пчелами, они не реагировали на искусственное (создаваемое тритиевым ионизатором) увеличение в улье концентрации аэроионов до $2 \cdot 10^6 \text{ см}^3$ [33]. Осы также не реагировали на ионизацию внутригнездового пространства.

Вибрации опорного субстрата. Отношение пчел к вибрациям опорного субстрата прослежено на пчелах, содержащихся примерно по 200 особей в энтомологических садках размером 13×116 см. Зависимость колебаний деревянных стенок садков от частоты и напряженности ЭП выражается уравнением $A = 0.036A_1 f^2$, где A – амплитуда вибро смещения, A_1 – изменение амплитуды виброускорения, f – частота ЭП.

При действии ЭП частотой 500 Гц и напряженностью 15 кВ/м амплитуда вибро смещения стенок садка составляла 0.18 ± 0.02 нм. Такие вибрации опорного субстрата не возбуждают пчел. У них порог чувствительности к колебаниям опорного субстрата на частоте 500 Гц составляет около 5 нм [34]. Но это стимулирует у пчел не активизацию, а торможение локомоций [21].

У ос чувствительность субгенуальных органов к вибрациям опорного субстрата примерно в три раза ниже, чем у пчел [35]. Поэтому осы, как и пчелы, не могут воспринимать колебания опор-

ного субстрата, возникающие под действием ЭП, напряженность которого многократно превосходит порог чувствительности к этому стимулу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Природные ЭП и МП существовали на Земле задолго до появления на ней жизни. В процессе ее зарождения и эволюции эти физические факторы, взаимодействуя с биоэлектрическими процессами, оказывали влияние на состояние и функционирование организмов.

К флуктуациям некоторых естественных ЭП животные приобрели адаптацию, что выражается, например, в реагировании пчел и муравьев на усиление атмосфериков, происходящее при приближении грозового фронта. Для этих насекомых усиление атмосфериков служит сигналом приближения неблагоприятных погодных условий, что стимулирует у пчел инстинкт хоминга, а у муравьев – защиты муравейника от дождя [9, 12].

Преимущественно неадекватно по отношению к экологической ситуации пчелы, осы и муравьи реагируют на интенсивные искусственные ЭП антропогенной природы. Низкочастотные ЭП высокой напряженности стимулируют у них различные аномалии поведения. Насекомые резко активизируются, покидают свои жилища и проявляют немотивированную агрессивность. У пчел некоторое проявление адаптации к ЭП высокой напряженности при длительном воздействии выражается в обеспечении электрической изоляции леткового прохода, который усиленно покрывается воско-прополисовой смесью [23,24]. Это защищает пчел, находящихся под ВЛ ЛЭП, от раздражения наведенными токами при соприкосновениях с поверхностью леткового прохода. На теле пчелы, подлетающей к улью под ЛЭП с напряжением 500 кВ, наводится ток около $4 \cdot 10^{-4}$ нА, а под ЛЭП с напряжением 750 кВ – $3 \cdot 10^{-3}$ нА [35].

В восприятии насекомыми ЭП участвуют специализированные механорецепторы и/или неспецифические структуры. Один из механизмов восприятия ЭП основан на притяжении или отталкивании под действием кулоновских сил первичных преобразователей механорецепторных органов, реагирующих на смещение. Под действием низкочастотных ЭП колеблются антенны и волоски быстроадаптирующихся трихонидных сенсилл, выполняющих у пчел функцию фонорецепторов [37].

Минимальная напряженность однородного ЭП, отклоняющего волосок быстроадаптирующейся трихонидной сенсиллы пчелы на 1° , составляет 20–25 кВ/м. Рост неоднородности ЭП, связанный, например, со сближением головами двух или более пчел, увеличивает угол отклонения во-

лосков. При сближении головами двух пчел их волоски отклоняются на 1° при напряженности 7–10 кВ/м [38, 39]. Очевидно, что поэтому одна пчела, находясь на электрически изолированной поверхности, не реагирует, а две реагируют на ЭП напряженностью 50 кВ/м.

Колебания антенн насекомых воспринимается джонстоновыми органами. У пчел при одинаковой напряженности ЭП максимальное отклонение антенн происходит под действием ЭП частотой 50 Гц. На этой частоте при напряженности 5, 7 и 10 кВ/м антенны отклоняются соответственно на 2, 3 и 6° . Накопление статического заряда на теле пчел, связанное с их активизацией, влияет на увеличение угла отклонения антенн [21]. Поэтому ЭП высокой напряженности может восприниматься джонстоновыми органами антенн.

Неспецифический механизм восприятия ЭП основан на раздражении насекомых наведенными токами, протекающими в местах их контактирования между собой и/или токопроводящими поверхностями. Частотная характеристика чувствительности к ЭП определяется в основном величиной наводимого им тока и эффективностью его контактного действия. Поскольку ток наводится в покровах тела, характеризующихся высоким сопротивлением, то величина наводимого тока нелинейно связана с частотой ЭП. Вероятнее всего, наводимый ток достигает максимума на частоте около 500 Гц, что согласуется с областью наибольшей чувствительности к ЭП, хотя чувствительность к току с понижением частоты возрастает [22]. Но под действием постоянного ЭП ток не наводится. Поэтому пчелы не реагируют на ЭП постоянного тока [21].

Высокая вариабельность чувствительности к ЭП связана с действием ряда случайных факторов. К ним относится изменчивость величины контактного тока. Она во многом зависит от электропроводности контактирующих поверхностей, которая определяется их свойствами и состоянием. В местах контакта могут находиться вещества различной электропроводности: корм, частицы пыли, воска, прополиса и т. п. Кроме того, с увеличением общей массы агрегирующихся пчел возрастает величина наводимого тока. В зонах скопления пчел создаются значительные локальные градиенты напряженности, которые можно рассматривать как вторичные поля, выступающие в роли дополнительных стимуляторов возбуждения. По этой причине взаимные ужаления происходят в местах больших скоплений пчел. Повышению их агрессивности способствует наличие в ЭП токопроводящих тел. Рефлекс ужаления стимулирует изолированный проводник, на который подается напряжение, составляющее всего несколько десятков вольт.

С раздражением пчел и муравьев наведенными токами связана модификация их поведения перед грозой. На расстоянии 50 км от грозового фронта напряженность пульсаций ЭП может достигать 10 кВ/м [13, 40], что превышает порог чувствительности к этому стимулу. С приближением грозового фронта у пчел-фуражиров, находящихся на цветках, возрастает частота прерывания наполнений зобика [41]. Это стимулирует у пчел повышение агрессивности и возвращение в ульи. У муравьев раздражение наведенными токами ассоциируется с опасностью, стимулирующей закрытие входных отверстий в муравейнике.

Таким образом, пчелы, осы и муравьи реагируют на искусственные низкочастотные ЭП высокой напряженности, хотя не обладают для этого специализированными рецепторами. Но, используя преимущественно неспециализированные средства восприятия ЭП, пчелы приобрели инстинкты хоминга, а муравьи — защиты муравейника перед ненастной погодой. Предвестниками непогоды служат у пчел и муравьев атмосферические интенсивность которых возрастает при приближении грозового фронта, усиливающего вариации напряженности ЭП. Пчелы, обладая совершенными средствами связи, изменяют указание координат источника корма соответственно суточным вариациям магнитного поля Земли.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая работа не содержит описания исследований с использованием людей и животных в качестве объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. С. Пресман, *Электромагнитные поля и живая природа* (Наука, М., 1968).
2. Ю. В. Сербант и М. П. Троянский, *Радиоволны и живой организм* (Знание, М., 1969).
3. А. П. Дубров, *Геомагнитное поле и жизнь* (Гидрометеоиздат, Л., 1974).
4. Ю. А. Холодов, *Реакции нервной системы на электромагнитные поля* (Наука, М., 1975).
5. О. В. Белянский, М. Б. Голант и Н. Д. Девятков, *Миллиметровые волны в биологии* (Знание, М., 1988).
6. Е. К. Еськов, *Успехи соврем. биологии* **123** (3), 195 (2003).
7. Е. К. Еськов и А. И. Торопцев, *Журн. эволюц. биохимии и физиологии* **15** (5), 500 (1979).

8. Е. К. Еськов, Изв. АН СССР. Сер. биол., № 1, 135 (1982).
9. Е. К. Еськов, *Жилища насекомых* (Знание, М., 1983).
10. Е. К. Еськов, *Экология медоносной пчелы* (Русское слово, Рязань, 1995).
11. Г. М. Длусский, *Муравьи рода Formica* (Наука, М., 1967).
12. В. К. Дмитриенко и Е. С. Петренко, *Муравьи таежных биоценозов Сибири* (Наука, М., 1976).
13. Дж. А. Чалмерс, *Атмосферное электричество* (Гидрометеоиздат, Л., 1974).
14. Е. К. Еськов, *Биофизика* **63** (3), 561 (2018).
15. Е. К. Еськов и А. М. Сапожников, Изв. АН СССР. Сер. биол., № 3, 395 (1979).
16. Е. К. Еськов, *Зоол. журн.* **64** (4), 606 (1985).
17. Е. К. Еськов, *Журн. эволюц. биохимии и физиологии* **17** (2), 178 (1981).
18. Е. К. Еськов, *Экология*, № 6, 76 (1982).
19. Е. К. Еськов, *Акустическая сигнализация общественных насекомых* (Наука, М., 1979).
20. Е. К. Еськов, *Экология*, № 1, 60 (1997).
21. Е. К. Еськов, *Этология медоносной пчелы* (Колос, М., 1992).
22. Е. К. Еськов и А. М. Сапожников, *Биофизика* **24** (4), 780 (1979).
23. Е. К. Еськов и Н. И. Брагин, *Журн. общ. биологии* **47** (6), 823 (1986).
24. Е. К. Еськов и Н. И. Брагин, *Пчеловодство*, № 2, 9 (1986).
25. U. Warnke and R. Paul, *Umschau*, № 3, 415 (1975).
26. W. E. Caldwell and F. Russo, *J. Genet. Physiol.* **113** (2), 233 (1968).
27. M. M. Walker and M. E. Bitterman, *J. Exp. Biol.* **145**, 489 (1989).
28. А. Л. Чижевский, в сб. *Труды практической лаборатории по зоопсихологии* (М. 1928), вып. 1, сс. 42–47.
29. G. Altman and U. Warnke, *Apidologie* **2** (4), 309 (1971).
30. Р. Фейман, Р. Лейтон и М. Сендлс, *Феймановские лекции по физике* (Мир, М., 1966), т. 6, сс. 201–207.
31. Н. Г. Бочкарев, *Магнитное поле в космосе* (Наука, М., 1985).
32. M. Lindauer and H. Martin, *Z. Vergl. Physiol.* **60**, 219 (1968).
33. Е. К. Еськов и Г. А. Миронов, *Экология*, № 6, 81 (1990).
34. H. F. Little, *Ann. Entomol. Soc. Amer.* **55**, 82 (1962).
35. H. Autrum and W. Schneider, *Z. Vergl. Physiol.* **31** (1), 77 (1948).
36. V. P. Bindokas and B. Grenderg, *Dioelectromagnetics* **5**, 305 (1984).
37. Е. К. Еськов, *Биофизика* **20** (4), 646 (1975).
38. Е. К. Еськов и Г. А. Миронов, *Докл. АН СССР* **309** (1), 233 (1989).
39. Е. К. Еськов и Г. А. Миронов, *Биофизика* **35** (4), 675 (1990).
40. M. Friedmann, *Electrotechnik und Masghinenbau* **91** (10), 510 (1975).
41. L. Schua, *Z. Vergl. Physiol.* **34**, 258 (1952).

Perception and Specificity of Behavioral Effects observed in Honey Bees, Paper Wasp, and Red Wood Ants in Response to Low Frequency Electric Field

E.K. Eskov

Russian State Agricultural Correspondence University, ul. Yu. Fuchika 1, Balashicha, Moscow Region, 143900 Russia

Bees, wasps and ants have no specialised receptors for electroreception. An adequate response to naturally occurring electric charge in bees and ants is related to the effects of atmospheric produced due to less distant thunderstorms. Perception of low-frequency high-voltage electric field in insects involves activation of primary transduction elements of mechanoreceptors reflecting their movements. The nonspecific mechanism of electroreception is triggered when insects while in contact with each other and / or electrically conductive surfaces are stimulated with electric fields. The frequency response of the sensitivity to electric fields is determined mainly by the magnitude of the electric current used and its intensity between insect bodies and/or conductive material. The magnitude of the current used for the insect body is nonlinearly related to the electric field frequency. The region with the highest sensitivity to electric field is at about 500 Hz, which is consistent with the maximum value of the current used. Herewith, the threshold of sensitivity to electric field in wasps and bees are about 0.04 kV/m and 0.45 kV/m, respectively. Ants exposed to electric fields ranging between 7–10 kV/m show impairment in locomotion. The magnetic fields and ionization associated with the generation of electric fields up to 15–20 kV/m do not stimulate behavioral changes in bees.

Keywords: bees, wasps, ants, electric field, sensitivity, behavior anomalies, adequate response