

Физика биологии и медицины

Правильная ссылка на статью:

Саримов Р.М. Влияние гипомагнитных условий на размер зрачка человека // Физика биологии и медицины. 2024. № 1. С. 24-40. DOI: 10.7256/2730-0560.2024.1.43854 EDN: RDFYOU URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=43854

Влияние гипомагнитных условий на размер зрачка человека

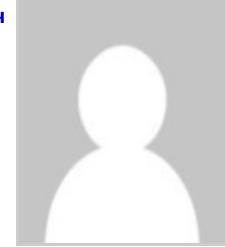
Саримов Руслан Маратович

ORCID: 0000-0002-2751-1615

кандидат биологических наук

старший научный сотрудник, ИОФ РАН

119991, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 38



rusa@kapella.gpi.ru

[Статья из рубрики "Биофизика"](#)

DOI:

10.7256/2730-0560.2024.1.43854

EDN:

RDFYOU

Дата направления статьи в редакцию:

21-08-2023

Аннотация: Ранее сообщалось, что гипомагнитные условия, полученные в результате 100-кратного уменьшения индукции геомагнитного поля, влияют на когнитивные процессы человека, что оценивалось в нескольких компьютерных тестах. Экспозиция в гипомагнитных условиях в течение 40 минут приводила к статистически значимому увеличению как времени выполнения, так и количества ошибок в заданиях. Величина этого магнитного эффекта, усредненная по 40 здоровым испытуемым в 80 ок洛часовых экспериментах, составила около 1.7 процента. В настоящей работе описаны результаты исследования, в котором характеристики состояния правого глаза каждого испытуемого записывались на видео, в то время как испытуемый выполнял когнитивные тесты. Оказалось, что в гипомагнитных условиях размер зрачка увеличивается. Этот эффект был рассчитан на основе обработки большого массива данных, включающего более миллиона видеокадров. Усредненный магнитный эффект составил около 1.6 процента. С учетом гетерогенности уровень значимости эффекта близок к значимому (0.07, АНОВА, фактор испытуемые — случайный). Магнитные реакции, зафиксированные как для

различных когнитивных тестов, так и для размера зрачка, наблюдаемые одновременно, не коррелируют. Приблизительно равное число испытателей показывали положительные и отрицательные эффекты в каждом тесте. Неспецифические реакции на магнитное поле, по-видимому, являются случайными.

Ключевые слова:

биологические эффекты, гипомагнитные условия, магнитные поля, магнитный отклик человека, размер зрачка глаза, тест на реакцию, тест Струпа, тест Шепарда, тест на цветовосприятие, неспецифический магнитный эффект

Введение

Роль геомагнитного поля (ГМП) в процессах жизнедеятельности остается неясной. Даже тот факт, что некоторые животные могут ориентироваться с помощью ГМП, пока до конца не объяснен [1,2]. Природа биологических эффектов, вызываемых такими слабыми магнитными полями, является физической проблемой [3]. Существуют как эпидемиологические [4], так и лабораторные [5,6] исследования, показывающие определенную связь между уровнем электромагнитных полей переменного тока и состоянием здоровья человека. Однако, относительно мало известно о влиянии слабого постоянного магнитного поля, порядка ГМП, на человека. Имеется лишь несколько лабораторных исследований, посвященных изучению когнитивных эффектов и эффектов на сердечнососудистую систему слабых статических магнитных полей, в частности гипомагнитных условий (ГУ). В работе [7] 24 испытуемых подвергались непрерывному воздействию ГУ 50 нТл в течение двух недель. До и после магнитного воздействия проводился ряд психологических тестов: тест на восприятие пространства, зрительно-пространственную память, зрительно-моторную координацию, воспроизведение временных интервалов, равновесие испытуемого. Во всех этих тестах не было обнаружено существенной разницы между данными, полученными в геомагнитной и гипомагнитной среде. Однако в другой более ранней работе этого автора с шестью испытуемыми в ГУ было зафиксировано изменения в частоте слияния мельканий зрительного стимула, хотя по другим психофизиологическим тестам и параметрам сердечнососудистой системы (систолическое и диастолическое давление, ЧСС) эффектов обнаружено не было [8]. В работе [9], усредненной по 55 испытуемым, чувствительность человеческого глаза к визуальному световому стимулу в ГУ оказалась меньше, чем в ГМП на 6–7%.

В серии исследований под руководством Гурфинкеля Ю.И. были изучено влияние ГУ в системе магнитной экспозиции, которая была разработана и создана при участии автора данной публикации и фактически являлась следующей версией установки используемой в данной публикации. В работе [10] 32 человека дважды участвовали в двухчасовых экспериментах в режимах ГМП(30 мин)/ГМП(60 мин)/ГМП(30 мин) и с включением гипомагнитных условий ГМП(30 мин)/ГУ(60 мин)/ГМП(30 мин). Было зафиксировано увеличение на 10–15 % скорости капиллярного кровотока испытуемых, уменьшение на 3–4 % систолического и диастолического артериального давления, а также увеличение времени кардиоинтервала у возрастных (старше 40 лет) участников эксперимента [10]. Схожие эффекты были обнаружены в ранее опубликованной работе с меньшим количеством испытуемых [11]. Более длительные 8-часовые эксперименты проводились в

работе [\[12\]](#), где в той же установке исследовались показатели сердечнососудистой системы в ГУ у восьми испытуемых. По сравнению с контрольными условиями в ГУ были зафиксированы следующие эффекты: снижение ЧСС (примерно на 4 удара в мин), снижение АД (диастолического на 11 мм рт. ст., систолического на 16 мм рт. ст.). Насыщение гемоглобина крови кислородом под действием ГУ не изменилось. В другом исследовании в той же системе магнитной экспозиции при 8-часовой воздействии ГУ не были зафиксированы статистически значимые изменения в ЭЭГ активности и в сердечнососудистой системе испытуемых [\[13\]](#). Таким образом, имеющиеся данные о влиянии постоянных МП с индукцией порядка ГМП и меньше на когнитивные процессы и сердечнососудистую систему человека недостаточны и противоречивы [\[14\]](#).

В предыдущих работах [\[15,16\]](#) было обнаружено, что депривация ГМП до уровня ниже 400 нТ влияет на когнитивные процессы человека. Сорок человек дважды участвовали в экспериментах в исследовании с применением четырех когнитивных тестов. В ГУ увеличилось как количество ошибок, так и время выполнения заданий. В среднем магнито-биологический эффект (МБЭ) для разных измеряемых параметров варьировался от 1.5 до 2.5%. Суммарный МБЭ, рассчитанный как среднее значение за ~120 тысяч отдельных испытаний, составил $1.7 \pm 0.2\%$. Это значение было достаточно устойчивым. Когда массив данных ограничивался только измерениями времени выполнения задания, средний эффект составлял 1.64% [\[15\]](#). Если исключить из массива результаты шести испытуемых, показавших максимальный эффект, то средний эффект, равный 1.49%, сохранил свою статистическую значимость ($p < 0.004$) [\[16\]](#). Таким образом, в рамках данного исследования средний общий магнитный эффект у человека был сформирован по измеренным данным всех испытуемых. Наблюдаемый МБЭ не являлся следствием ни особой эффективности какого-либо из использованных тестов, ни наличия особо чувствительных испытуемых. Среди возможных существенных факторов изучались температура и атмосферное давление, но они не повлияли на результаты.

Следует отметить, что в [\[16\]](#) все восемь измеряемых характеристик являлись субъективными психологическими реакциями. Интересно было также понять, могут ли ГУ влиять на реакции человека, которые в основном не зависят от воли испытуемого. Размер зрачка — это характеристика, которая с помощью камеры четко фиксировалась при выполнении вышеупомянутых психологических тестов. Хотя психологически вызываемое сужение/расширение зрачка известно, физиологическая реакция на свет — зрачковый световой рефлекс — слишком выражена, чтобы зависеть от психологических факторов. Поэтому размер зрачка был выбран для отслеживания одновременно с описанным выше тестированием испытуемых при воздействии в контрольных условиях и в ГУ. Целью проведения настоящего исследования было выяснить, могут ли ГУ вызывать изменение размера зрачка глаза человека.

2. Методы

2.1 Испытуемые

Специального отбора испытуемых не проводилось, но в группе из 40 человек в равном количестве присутствовали мужчины и женщины, а также люди в возрасте старше и моложе 40 лет. В итоге в экспериментах фактически участвовали четыре группы по 10 человек: мужчины старше и моложе 40 и женщины старше и моложе 40 лет. Каждый испытуемый проходил тестирование как в условиях ГМП, так и ГУ.

2.2 Система магнитной экспозиции

Создание ГУ достигалось путем компенсации ГМП с использованием четырех медных катушек, закрепленных вдоль одной оси в специальном деревянном боксе размером $1 \times 1 \times 1.5$ м³. По периметру бокса крепилась проволочная сетка, которая экранировала испытуемого от внешних электростатических полей. Магнитное поле внутри бокса измерялось с помощью феррозондовых датчиков магнитного поля, закрепленных около головы испытуемого, примерно в центре бокса. Цифровая система обратной связи компенсировала (вдоль главной оси) внешнее магнитное поле и его вариации, вызванные городским электротранспортом и промышленными шумами. Четыре кольцевые катушки диаметром 1 м располагались на расстоянии 0.5 м друг от друга и имели 40 витков в боковых катушках и 26.5 витков в средней. Общее активное электрическое сопротивление составляло 1.23 Ом. Неоднородность МП в рабочем пространстве системы (голова и тело испытуемого) не превышала 2%. Главная ось системы была ориентирована параллельно вектору ГМП (44 мкТл) с точностью до 0.5°. Полоса пропускания системы обратной связи составляла около 10 Гц, при частоте измерения МП 1000 Гц. Остаточное значение МП внутри бокса во время экспериментов не превышало 0.4 мкТл вдоль главной оси и 0.6 мкТл в перпендикулярных направлениях.

2.3 Процедура тестирования

Каждый испытуемый проходил тестирование дважды; второй эксперимент проводился обычно через 30–50 дней после первого. В одной из этих двух сессий использовались ГУ, а в другой, для сравнения, были те же условия, но без ГУ, то есть эксперимент проводился в ГМП. Чтобы исключить возможный вклад от порядка проведения сеансов ГУ и ГМП, порядок их проведения для половины испытуемых был противоположным по отношению к другой половине испытуемых. Измерялось время обработки задания и количество ошибок в следующих тестах: (i) скорость выполнения простого двигательного рефлекса, (ii) распознавание цветных слов, (iii) кратковременная цветовая память и (iv) распознавание повернутых букв. Два из этих тестов были модификациями известных тестов Струппа (J.R. Stroop) и Шеппарда (R.N. Shepard).

Всего в данном исследовании измерялось восемь параметров. Протокол подробно описан в работе [\[16\]](#). Важно отметить следующее: каждый из 80 экспериментов состоял из трех временных периодов: 10 минут адаптации к экспериментальным условиям и подготовки к тестированию в ГМП; 10+10 минут в контрольных условиях ГМП; и 10+10+10+10 мин тестирования в условиях ГМП (в 40 "имитационных" или "sham" экспериментах) или в ГУ (в других 40 "реальных" экспериментах). Между всеми этими 10-минутными периодами помещались однominутные интервалы отдыха, так что общая продолжительность эксперимента составляла 76 минут. Испытуемые не знали, в каких условиях в ГМП или ГУ проходил эксперимент.

Табл. 1 Схема проведения экспериментов для каждого из 40 испытуемых.

Table 1 Schematic of the experiments for each of the 40 subjects.

Серия эксперимента	1	2	3	4	5	6	7
Время	0-10 мин	10-30 мин	30-70 мин				
Эксперимент 1 (или 2)	Адаптация (ГМП)	Контроль(ГМП)			Реальное воздействие (ГУ)		
Эксперимент	Адаптация	Контроль(ГМП)			Мнимое/Sham (ГМП)		

2 (или 1)

(ГМП)

Для регистрации движений глаз был изготовлен специальный прибор. Пластиковая рамка, закрепленная на голове испытуемого, держала перед головой испытуемого аналоговую видеокамеру ACE-S560H (0.05 лк, 600 линий). Перед камерой устанавливался фильтр для отсечения света с длиной волны менее 810 нм. Чувствительность камеры была достаточной для работы в ИК-диапазоне. ИК-светодиоды расположенные вокруг камеры, освещали область правого глаза, что позволило значительно контрастировать зрачок глаза по сравнению с остальной частью лица испытуемого. Движения зрачка записывались в цифровом формате MPEG-4 с преобразованием в 8-битный серый с помощью устройства видеозахвата. Скорость составляла 25 кадров в секунду; продолжительность каждой из 80 записей составляла 76 мин. Можно легко посчитать, что всего в данном исследовании было собрано около 9 млн. кадров, половина из которых получена в условиях ГМП, а половина — ГУ.

2.4 Измерение и обработка данных

Была разработана оригинальная компьютерная программа, позволяющая последовательно обрабатывать кадры. После проведения 80 записей выяснилось, что одна запись не состоялась из-за технической неисправности. Поэтому результаты соответствующего испытуемого были удалены из набора данных, и программа обработала только 78 видеофайлов 39 испытуемых. Предварительная обработка была следующей.

Сначала программа вырезала фрагменты видеозаписей, которые соответствовали периодам адаптации к экспериментальным условиям и коротким интервалам моргания глаз. Осталось чуть менее 20 мин контрольного интервала (контроль в условиях ГМП), и 40 мин "sham" (ГМП) или "реального" (ГУ) воздействия. Таким образом, мы имели 39 часовых записей типа ГМП/ГМП, т.е. записей "контроль"+"sham", и 39 записей типа ГМП/ГУ, т.е. записей "контроль"+"реальное" воздействие ГУ.

Для каждого кадра (размером 680×572 пикселя) фильма программа находила изображение зрачка глаза, аппроксимировала зрачок эллипсом и определяла его параметры: короткую и длинную оси, угол поворота, горизонтальное и вертикальное положение зрачка, рис. 1. Эти значения сохранялись в файле, содержащем также временную метку, порядковый номер кадра и среднюю яркость кадра (средняя плотность серого в 8-битном диапазоне 0-255). Средняя яркость рассчитывалась для всей площади кадра, за исключением области глазного зрачка. Результаты каждого из 78 экспериментов были представлены в виде таблицы/файла, каждая строка которого соответствовала одному кадру и включала данные его обработки. Каждый столбец файла представлял собой массив: размеры эллипса, яркость кадра и т.д.

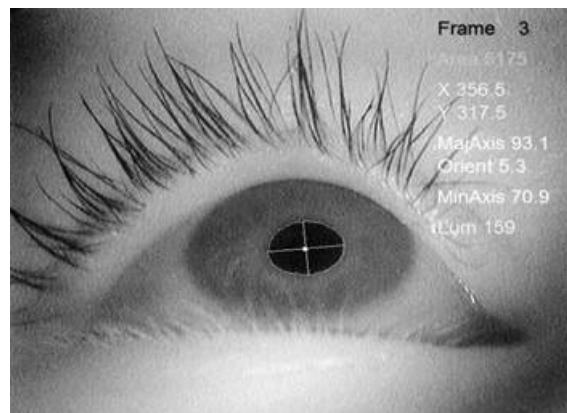


Рис. 1 Скриншот работы программы обработки видеокадров. Справа показаны параметры обработки кадра: номер кадра, площадь зрачка в пикселях, положение центра зрачка, длина осей эквивалентного эллипса глазного зрачка в пикселях, наклон осей в градусах и яркость кадра.

Fig. 1 Screenshot of the video frames processing program operation. Frame processing parameters are shown on the right: frame number, pupil area in pixels, pupil center position, length of the axes of the equivalent ellipse of the eye pupil in pixels, axes slope in degrees and frame brightness.

Второй этап обработки заключался в исследовании записанных массивов на наличие выбросов. Вследствие влияния множества неконтролируемых факторов (моргание глаза, сбой кодека и т.д.) массивы содержали не только регулярные изменения, но и шум. Некоторые значения в массивах могут отклоняться от средних значений настолько, что их артефактное происхождение весьма вероятно. Такие данные обычно удаляются из выборок. Программа удаляла из массива с обработанными данными целую строку кадра, если одно из значений в этой строке отклонялось от соответствующего среднего значения выборки более чем на три стандартных отклонения. Уменьшенные массивы использовались для дальнейших расчетов.

Во время тестирования глаз испытуемого вращается в разные стороны, поэтому зрачок виден из диафрагмы камеры под разными углами и приобретает форму эллипса. Реальный размер зрачка ближе к главной оси эллипса, поскольку малая ось изменяется как косинус угла проекции на камеру. Мы использовали главную ось в качестве основной наблюдаемой величины, которая определялась для каждого кадра.

Освещенность глаза в экспериментах могла меняться по многим причинам. Это и вариации естественного и искусственного дневного освещения в помещении, и свет от движущихся объектов на ЖК-мониторе перед испытуемым, и его индивидуальное положение в системе магнитной экспозиции. Несмотря на то, что средний спектр света попадающего в камеру был смещен в ИК-диапазон, вариации оптического излучения могут вносить свой вклад в результат из-за зрачкового светового рефлекса. Поэтому на это обратили особое внимание. Рассчитывалась средняя освещенность области вокруг глазного зрачка, а также вместе с тем размер глазного зрачка для каждого кадра. Оказалось, что между этими двумя величинами существует прямая корреляция, а не обратная, как можно было бы ожидать, рис. 2.

Это объясняется тем, что положение камеры не было фиксированным относительно лица (объекта съемки). Испытуемый мог неосознанно изменять положение камеры в ходе эксперимента. Таким образом, расстояние между камерой и глазом часто менялось. Чем меньше это расстояние, тем больше освещенность за счет ИК-излучения светодиодов и тем больше был размер зрачка, видимого камерой; это геометрический эффект. В то же время средняя яркость по всем кадрам в экспериментах с ГУ иногда оказывалась больше, чем в экспериментах с ГМП. По этой причине было сделано предположение, что наблюдаемое увеличение размера зрачка при экспозиции в ГУ было, по крайней мере частично, обусловлено этим геометрическим эффектом. Поэтому потребовалась коррекция, позволяющая учесть корреляцию и исключить геометрический эффект яркости.

Процедура коррекции заключалась в определении коэффициентов простой линейной регрессии и коррекции размеров зрачков путем вычитания соответствующих вкладов регрессии. Наклон линии регрессии на рис. 2 составляет $b = 0.3230$, поэтому

скорректированные значения размеров были рассчитаны как $a_{corr} = a - b(E - E_{mean})$, где a — исходная площадь зрачка, E — соответствующая яркость, а E_{mean} — средняя яркость, усредненная по всему набору данных. Разумеется, не было обнаружено корреляции между значениями яркости кадра и скорректированными размерами зрачков. Тем не менее, магнитный эффект после коррекции остался статистически значимым ($p < 0.001$, t-статистика равна 77).

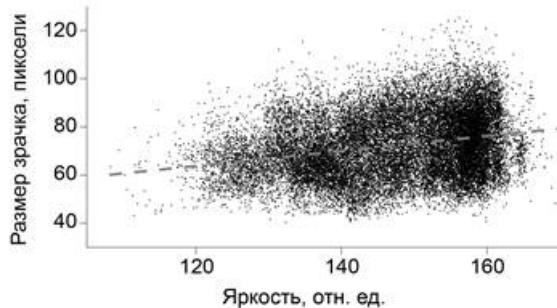


Рис. 2 Корреляционная диаграмма между размером зрачка и освещенностью в области вокруг зрачка, измеренной по яркости кадра. На графике показана каждая сотая точка из более чем трех миллионов точек. Линия регрессии рассчитана для всего набора точек.

Fig. 2 Correlation diagram between pupil size and illuminance in the area around the pupil, measured from the luminance of the frame. The plot shows every hundredth point of more than three million points. The regression line is calculated for the entire set of points.

2.5 Определение магнитных эффектов

Массивы измеренных размеров зрачков, соответствующие контрольному, или эталонному, 20-минутному интервалу и 40-минутному интервалу "экспозиции", обозначенные как c и x для "реальных" экспериментов и s и y для "sham" экспериментов, соответственно, c и s означают контроль, а x и y — воздействия (Табл. 2). Тогда c , x , s и y — выборочные средние этих массивов, а σ_c , σ_x , σ_s и σ_y — их стандартные отклонения, а i — индекс, которым нумеруются испытуемые.

Математические операции типа x/c подразумевают, что к каждому элементу массива x применяется умножение на $1/c$. Тогда мы могли бы определить результат воздействия на испытуемого в "реальном" эксперименте как среднее значение массива x/c , то есть как нормированный эффект $x' \equiv x/c$.

Однако это не будет магнитным эффектом, поскольку изменения c к x могут быть обусловлены естественными физиологическими ритмами, обучением в процессе тестирования и т.д. Правильное определение магнитного эффекта реального воздействия ГУ будет только в сравнении с результатом "sham" эксперимента для каждого испытуемого, где среднее значение массива y/s , или $y' \equiv y/s$ так же рассчитывается. Таким образом, средний индивидуальный магнитный эффект определяем как $m_i = (x'_i - y'_i)/y'_i$. Как видно, при таком определении средний индивидуальный магнитный эффект можно рассматривать как среднее значение массива $m_i = (x_i/c_i - y'_i)/y'_i$. Пример обработки данных для одного испытуемого можно найти в табл. 3.

Все нормированные массивы каждого испытуемого объединялись в единые массивы, x и y , отдельно для "реального" и "sham" экспериментов. Из этих массивов можно было

посчитать магнитный эффект M (Табл. 2) как :

$$X \equiv \bigcup_i \frac{x_i}{c_i}, \quad Y \equiv \bigcup_i \frac{y_i}{s_i}, \quad M \equiv (X - Y)/Y$$

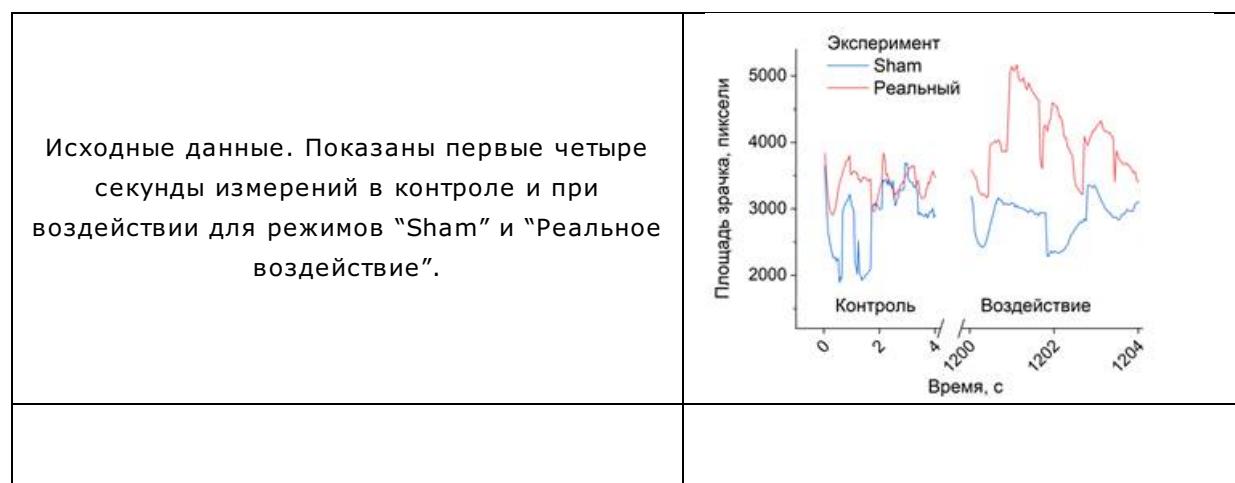
Табл.2 Обозначения исходных и обработанных данных.

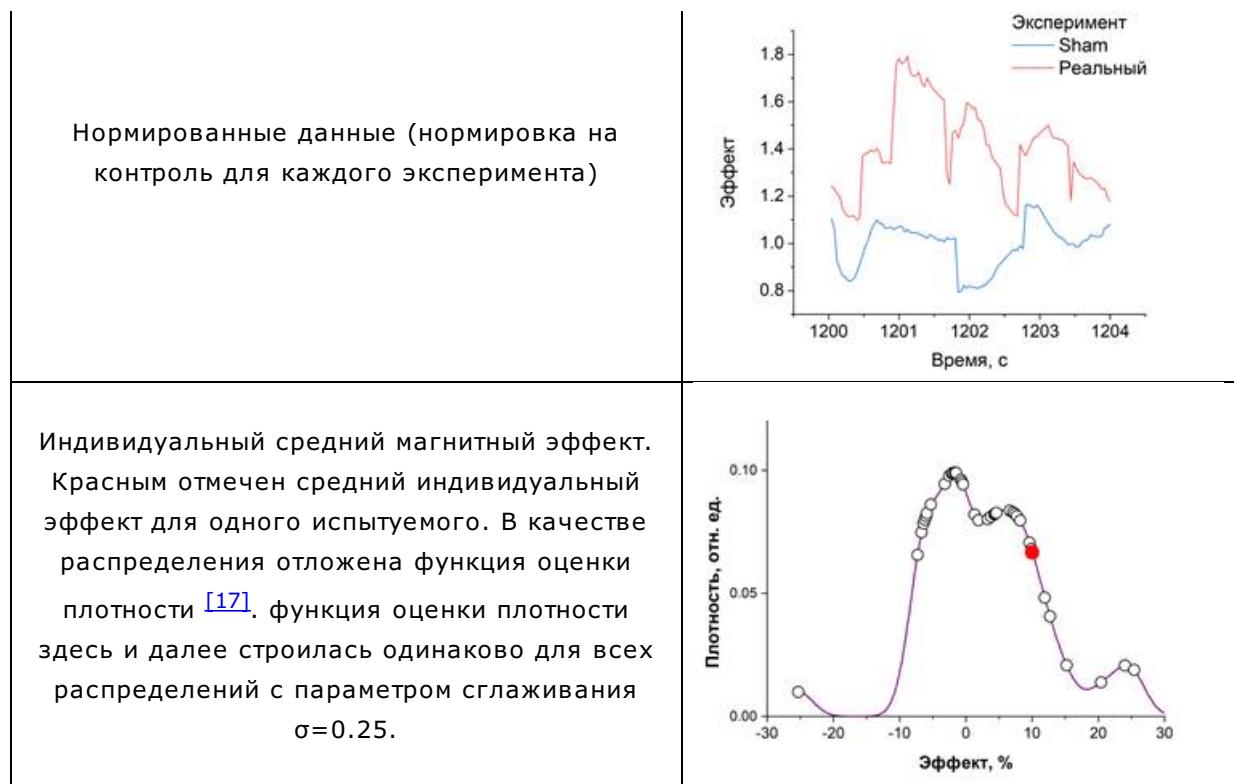
Table 2 Designations of initial and processed data.

Время эксперимента		10-30 мин	30-70 мин
		Контроль	Воздействие
Массивы исходных данных	Реальное воздействие	c	x
	Sham эксперимент	s	y
Выборочные средние (стандартные отклонения)	Реальное воздействие	$c(\sigma_c)$	$x(\sigma_x)$
	Sham эксперимент	$s(\sigma_s)$	$y(\sigma_y)$
Массивы нормированных данных (нормировка на контроль для каждого эксперимента)	Реальное воздействие	-	$X \equiv \bigcup_i x_i/c_i$
	Sham эксперимент	-	$Y \equiv \bigcup_i y_i/s_i$
Массивы индивидуальных магнитных эффектов			$m_i = (x_i/c_i - y_i')/y_i'$, где $y_i' = y_i/s_i$
Индивидуальный средний магнитный эффект			m_i
Магнитный эффект (для всей группы испытуемых)	-	-	$M \equiv (X - Y)/Y$
Массив элементарных магнитных эффектов с вычетом индивидуальных средних магнитных эффектов по каждому испытуемому	-	-	$E = \bigcup_i (m_i - m_i)$

Табл.3 Пример обработки данных одного испытуемого.

Table 3 Example of data processing for one subject.





3. Результаты

Распределения размеров зрачков, нормированных на их средние значения в контроле, представлены на рис. 3. Это распределения по относительным значениям размеров зрачков или относительных частот соответствующих значений, которые строятся в виде гистограмм. Распределения представлены в виде кривых нормированных на единицу площади под ними. Размеры массивов составили 1692192 для экспериментов с реальным воздействием и 1671263 с мнимым.

Как видно, распределения отличаются по средним значениям и близки к нормальному. Двухсторонний t-тест показывает, что различия статистически значимы с малой вероятностью ошибки. Без учета гетерогенности объединяемых массивов статистическая значимость высока, $p < 0.001$, с учетом гетерогенности (испытуемые использовались в статистике как случайный фактор) значимость различий составила $p < 0.07$ (ANOVA, фактор "испытуемые" — случайный).

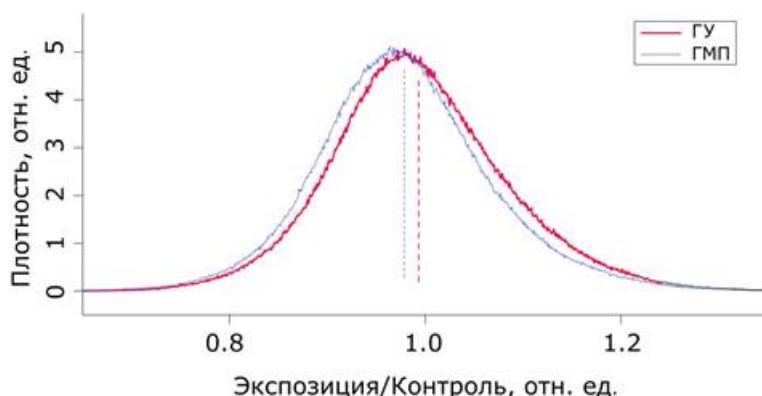


Рис. 3 Распределения нормированных на контроль в этом же эксперименте размеров зрачков при "sham" (ГМП) и "реальных" (ГУ) экспозициях, представленные в виде гистограмм из 1000 столбцов. Средние значения (пунктирные линии) и стандартные

отклонения выборок составили: $X=0.9935$, $\sigma_X=0.0908$ и $Y=0.9785$, $\sigma_Y=0.0897$ для ГУ и ГМП соответственно.

Fig. 3 Distributions of normalized to the control in the same experiment pupil sizes at "sham" (GMF) and "real" (HMC) exposures presented as 1000-column histograms. The mean values (dashed lines) and standard deviations of the samples were: $X=0.9935$, $\sigma_X=0.0908$ и $Y=0.9785$, $\sigma_Y=0.0897$ for HMC and GMF respectively.

Среднюю величину эффекта ГУ можно только рассчитать, а не измерить непосредственно, поэтому она зависит от определения, что такое магнитный эффект. Определение $M \equiv (X-Y)/Y$ (см. раздел 2.5) дает для скорректированного набора данных $M \approx 0.79\%$. Распределения размеров зрачков, соответствующие "реальному" и "sham" экспериментам, т.е. построенным на массивах X и Y , практически не отличаются от представленных на рис. 3, с небольшими изменениями (не показано).

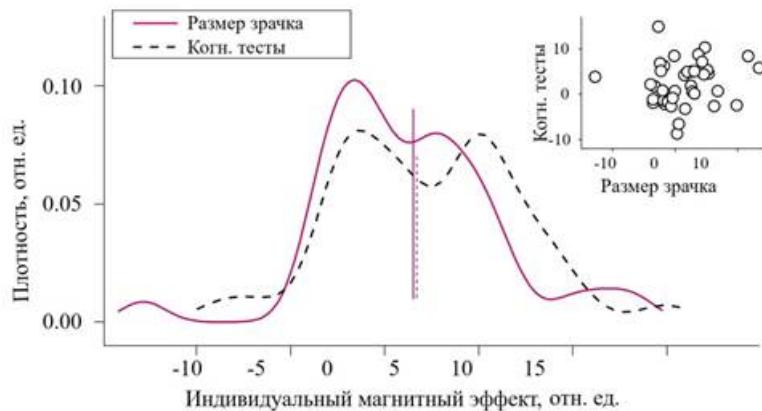


Рис. 4 Распределения индивидуальных средних магнитных эффектов, рассчитанные для одних и тех же испытуемых: в настоящей работе — по измерениям размера зрачка (фиолетовая сплошная линия, $\sigma = 0.048$) и в работе [16] — по параметрам когнитивных тестов (пунктирная линия, $\sigma = 0.061$); приведены средние значения. Распределения нормированы на единичную площадь под кривой. Точки на графике справа сверху: корреляционная диаграмма для индивидуальных магнитных эффектов.

Fig. 4 The distributions of individual average magnetic effects calculated for the same subjects: in the present work - from pupil size measurements (purple solid line, $\sigma = 0.048$) and in [16] - from cognitive test parameters (dashed line, $\sigma = 0.061$); average values are given. The distributions are normalized to the unit area under the curve. Dots in the graph on the upper right: correlation diagram for individual magnetic effects.

Как сказано выше, с учетом статистической неоднородности объединенного по всем испытуемым массива данных значимость различий составила $p<0.07$, — значение, близкое к принятому пределу ($p=0.05$). Дальнейший анализ, тем не менее, обоснован, поскольку он касается не общего среднего, а индивидуальных магнитных эффектов и средней формы их распределений. Форма распределений существенно отличается от нормальной, что позволяет сделать некоторые заключения о природе неспецифических магнитных эффектов.

Индивидуальные магнитные эффекты отражают чувствительность испытуемых к 40-минутному воздействию ГУ. Индивидуальные магнитные эффекты в обычном понимании рассчитывались для каждого испытуемого. Для этого массивы $m_i = (x_i/c_i - y'_i)/y'_i$ были разделены, и для каждого из них была вычислена средняя величина \bar{m}_i . Количество

средних величин ($i=39$), было достаточно для составления массива $\mathbf{u} \equiv \mathbf{U}_i \mathbf{m}_i$. Распределение его элементов показано на рис. 4. Также показано аналогичное распределение, рассчитанное по параметрам когнитивных тестов (см. ниже). Распределения представлены в виде функции оценки плотности с гауссовским ядром шириной, равной 0.25 стандартных отклонений, что соответствует гистограмме, состоящей примерно из восьми столбцов в основном интервале от $-\sigma_u$ до σ_u .

Важно, чтобы средние магнитные эффекты, взятые по отдельности, были статистически значимыми. У всех испытуемых, кроме двух, показавших наименьшие средние магнитные эффекты 0.13% и 0.04%, уровень статистической значимости был высок $p < 0.001$. Распределения "реального" и "мнимого" эффектов для каждого из испытуемых аналогичны приведенным на рис. 2.

4. Обсуждение

В настоящем исследовании показано, что 40-минутная экспозиция в ГУ оказывает статистически значимое воздействие на испытуемых: зрачки их глаз испытывают слабое расширение. Несмотря на то, что суммарный средний эффект невелик, распределения измеренных величин дают информацию о природе магнитного воздействия на человека.

Распределение, построенное по совместному массиву $\mathbf{U}_i \mathbf{m}_i$, объединяет два различных распределения магнитных эффектов, которые могут быть разделены. Интерес представляют формы этих распределений. Первая — это общая форма "элементарных магнитных эффектов", т.е. то, что является общим для отдельных распределений, помимо их средних значений. Распределения элементарных магнитных эффектов для каждого испытуемого отличаются средними значениями, но имеют нечто общее — форму, которая видна после вычитания средних из массивов. Распределение массива элементарных магнитных эффектов с вычетом средних по каждому испытуемому $\mathbf{E} = \mathbf{U}_i(\mathbf{m}_i - \bar{\mathbf{m}}_i)$ (рис. 5 кривая А) выглядит очень схоже с распределением нормированных исходных данных (Рис. 3). Дисперсия распределения \mathbf{E} обусловлена многими случайными факторами функционирования мозга и физической среды, в то время как распределение индивидуальных средних магнитных эффектов (рис. 5 кривая Б) определяется вариабельностью индивидуальной магнитной чувствительности. При отсутствии вклада МП, ($\bar{\mathbf{m}}_i = 0$) по центральной предельной теореме [18] дисперсия \mathbf{E} (рис. 5 кривая А) при переходе к распределению индивидуальных средних магнитных эффектов (рис. 5 кривая Б) должна уменьшиться на σ/\sqrt{n} , где n — количество средних, в нашем случае (39 испытуемых), то есть дисперсия усредненного массива должна быть $\frac{1}{\sqrt{39}} \approx 0.016$, что в три раза меньше наблюдаемой величины (рис. 5 кривая Б). То есть различия в дисперсиях в двух массивах должны объясняться индивидуальными магнитными эффектами.

О том, что индивидуальные различия могут приводить к различным магнитобиологическим эффектам для переменных 50-Гц магнитных полей, ранее было опубликовано в [19]. Распределения рис. 5 показывают, что средний магнитный эффект не обусловлен наличием небольшой сверхчувствительной группы испытуемых. Практически все испытуемые проявили чувствительность к ГУ. Однако практически равные доли испытуемых дали разнонаправленные реакции на ГУ, что привело к небольшому среднему эффекту. В то же время индивидуальные магнитные эффекты существенно изменялись в пределах $\pm(10-12)\%$. Таким образом, стандартное отклонение существенно больше, чем среднее значение индивидуальных средних. По этой причине общее среднее значение малозначимо.

Возможная систематическая апостериорная погрешность была связана только с повышенным уровнем яркости кадров в "реальном" наборе экспериментов. Однако это оказалось несущественным, так как зрачковый рефлекс имеет место только при видимом свете, но не при ИК-излучении. Кроме геометрического эффекта, других возможных влияний на размер зрачка не обнаружено. Ни подсветка светодиодами, ни искусственное освещение в помещении, ни перепады дневного света на улице не повлияли на размер зрачка, что было установлено в ходе специальной сессии тестирования.

Как было сказано выше, в когнитивных тестах было $N = 8$ измеряемых параметров. Для каждого из них был выделен массив индивидуальных средних магнитных эффектов, и все массивы были отсортированы в соответствии с порядковым номером испытуемого. Обозначим за $\mathbf{u}^{(n)}$ эти упорядоченные массивы, где индекс $n = 1, 2, \dots, N$, — это порядковый номер используемого "психологического" измерителя; $n = 0$ означает "размер глазного зрачка". Затем можно оценить корреляцию между этими массивами. Большая корреляция будет означать, что один и тот же испытуемый обладает более высокими или более низкими показателями магнитной чувствительности независимо от того, какой тест использовался для определения его чувствительности. Оказалось, что все эти массивы не коррелируют между собой, среднее значение матрицы коэффициентов корреляции составило:

$$\frac{1}{N(N-1)} \sum_{n' \neq n} \text{corr}(\mathbf{u}^{(n')}, \mathbf{u}^{(n)}) \approx 0.09$$

Это указывает на то, что среди 39 испытуемых не было особо чувствительных, хотя в каждом отдельном тесте были люди, демонстрирующие достаточно четкую реакцию на гипомагнитное воздействие.

Сужение и расширение глазного зрачка происходит независимо от воли человека. Это объективная физиологическая реакция, а не реакция, основанная на субъективной воле. Поэтому интересно, что существует сходство между распределениями, построенными по обеим реакциям (рис. 4). Существенные выводы следуют из того, что это сходство существует наряду с отсутствием корреляции между индивидуальными средними значениями различных измеряемых величин.

(1) "Крылья" в форме распределений наблюдаются при больших абсолютных значениях магнитных эффектов. Крылья, площадью всего в несколько процентов, не так четко выражены, как основные пики, однако они видны в форме индивидуальных распределений, как для размеров зрачков, так и для параметров психологических реакций. Это позволяет поставить под сомнение утверждение, что в человеческой популяции существует группа людей, особенно чувствительных к электромагнитным полям. Речь идет о так называемом "синдроме электромагнитной гиперчувствительности", о котором неоднократно сообщалось в литературе [20], о том, что несколько процентов людей могут достаточно сильно реагировать даже на относительно слабые электромагнитные поля, которые не способны вызвать ощутимый нагрев тканей.

На первый взгляд, крылообразное распределение индивидуальных средних не противоречит гипотезе гиперчувствительности. Однако отсутствие корреляции между магнитными эффектами, измеряемыми по размеру зрачка глаза, и психологическими реакциями (рис. 4), свидетельствует о том, что люди, демонстрирующие ярко выраженный магнитный эффект, могут быть разными. Согласно результатам, некоторые люди, протестированные по определенному биологическому параметру, будут четко

реагировать на воздействие ЭМП. Однако если для измерения был выбран другой параметр, то на то же самое ЭМП отреагирует другая незначительная группа людей. Предполагается, что гиперчувствительность к ЭМП существует только как случайная реакция. Физические и статистические причины случайности неспецифических магнитных откликов приведены в [21].

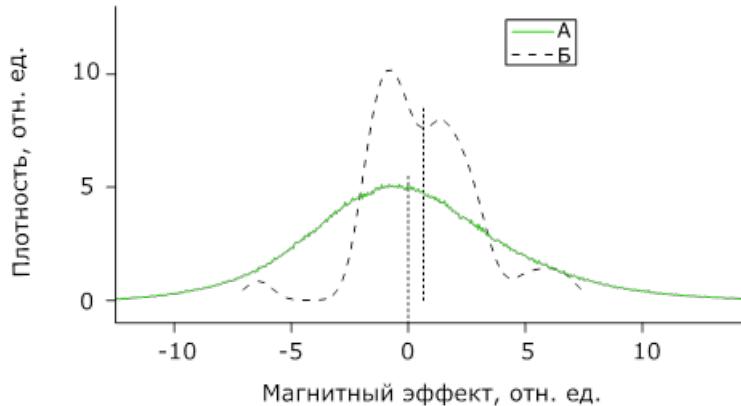


Рис. 5 Распределения массивов элементарных магнитных эффектов с вычетом средних по каждому испытуемому (А) и распределение индивидуальных средних магнитных эффектов (Б) имеют существенно разные стандартные отклонения, 0.1 и 0.048 соответственно.

Fig. 5 The distributions of elementary magnetic effects with the subtraction of the average for each subject(A) and the distribution of individual average magnetic effects (B) have significantly different standard deviations 0.1 and 0.048 respectively.

(2) Как было сказано выше, индивидуальные магнитные эффекты m_i были определены для одних и тех же испытуемых, но исходя из их различных характеристик, из размера глазного зрачка в настоящем исследовании, с одной стороны, и из количества ошибок и времени обработки теста в работе [16] с другой. Эти магнитные эффекты оказались некоррелированными. В то же время распределения этих эффектов достаточно схожи: оба имеют два больших пика и два малых пика, или крыла, на рис. 4. Этот факт свидетельствует о том, что реакция человека на воздействие МП не является системной.

Внешний фактор, например акустический шум или свет, может вызвать только системную реакцию, которая обусловлена восприятием человека, работой центральной нервной системы. В этом случае реакция разных организмов на внешний фактор должна быть схожей. По-видимому, то же самое справедливо и в отношении к внутренним, изначально уже системным факторам, например к биологическим ритмам. В отличие от таких факторов системного действия, МП является агентом, который, минуя сигнальные рецепторные системы человека, действует непосредственно на ткани, а значит, действует бессистемно, случайным образом. Именно это и наблюдается как отсутствие корреляции, см. (1), между различными биологическими показателями при воздействии на испытуемого ГУ. Испытуемый во время тестирования может быть магниточувствительным по одному параметру и одновременно нечувствительным по другому параметру.

(3) Ранее полученные результаты [16] о том, что изменения между ГМП и ГУ вызывают измеримую биологическую реакцию у человека согласуются с данными [9]. Авторы

последнего исследования пришли к выводу, что их данные не противоречат т.н. радикально-парному механизму, см. например [\[22\]](#). Согласно этой концепции, некоторые виды животных обладают магнитным чувством, поскольку ГМП воздействует на спин-коррелированные пары в криптохромных фоторецепторах сетчатки глаза. Результаты настоящего исследования расходятся с гипотезой, что реакция организма человека на МП связана со зрительной системой. Отсутствие корреляции между результатами различных тестов в (1) доказывает, что реакция человека на магнитное поле не является системной реакцией. Следовательно, это не реакция, вызванная зрительным анализатором и, в частности, изменениями в его криптохромах сетчатки.

Наши данные согласуются с идеей о том, что нет специфической локализации мишени МП в каком-то отдельном органе в организме человека. Мишениями, например, могут быть магнитные наночастицы, обнаруженные в тканях мозга человека [\[23\]](#). Магнитные наночастицы — это маленькие магниты, которые ведут себя подобно игле компаса; они могут вращаться во внешнем МП и вызывать клеточный отклик, если встроены в цитоскелет [\[24\]](#). Кроме того, магнитные наночастицы генерируют собственное относительно большое МП на уровне мТл. В свою очередь, это МП может влиять на магниточувствительные радикально-парные биохимические реакции [\[25\]](#). Так что внешнее МП более 200 нТл могло бы влиять на динамику магнитных наночастиц, а их собственное мТл-поле вызывать биологические эффекты [\[26\]](#).

5. Заключение

Гипомагнитное поле с индукцией около 400 нТл расширяет зрачок глаза человека в среднем на 1.6%. С учетом гетерогенности этот эффект близок к значимому ($p<0.07$, ANOVA). Этот результат основан на видеозаписи глаз человека при когнитивном тестировании 39 человек в обычной геомагнитной обстановке и при воздействии гипомагнитных условий.

Показано, что существует два типа распределений магнитных эффектов: (i) распределение элементарных магнитных эффектов и (ii) распределение индивидуальных средних магнитных эффектов. Стандартное отклонение этих распределений значительно превышает среднее значение распределений, что делает суммарный средний магнитный эффект неинформативным в отношении природы магнитных эффектов у человека.

Распределение индивидуальных средних магнитных эффектов имеет многопиковую форму, практически одинаковую для всех исследуемых параметров. Максимальные эффекты и пики распределения для каждого измеряемого параметра формируются вкладом разных людей.

Гипомагнитный эффект, исследованный у 39 испытуемых, измеренный по размеру зрачка глаза и восьми когнитивным параметрам, вероятно, является общим неспецифическим магнитным эффектом в человеческой популяции. В связи с тем, что магнитные реакции, наблюдаемые одновременно для разных параметров не коррелируют, эти реакции на магнитное поле, по-видимому, являются случайными, а для регистрации очень слабого суммарного магнитного эффекта требуется большой объем наблюдений.

Автор признателен В.Н. Бинги за ценные советы и замечания и Т.А. Матвеевой за помощь в работе.

Библиография

1. Johnsen, S., & Lohmann, K. J. (2008). Magnetoreception in animals. *Physics today*, 61(3),

29-35.

2. Mouritsen, H. (2012). Sensory biology: Search for the compass needles. *Nature*, 484(7394), 320-321. doi:10.1038/484320a
3. Binhi, V. N., & Rubin, A. B. (2022). Theoretical Concepts in Magnetobiology after 40 Years of Research. *Cells*, 11(2), 1-15. doi:10.3390/cells11020274
4. Schüz, J., Lagorio, S., & Bersani, F. (2009). Electromagnetic fields and epidemiology: an overview inspired by the fourth course at the International School of Bioelectromagnetics. *Bioelectromagnetics*, 30(7), 511-524. doi:10.1002/bem.20510
5. Ghione, S., Del Seppia, C., Mezzasalma, L., Emdin, M., & Luschi, P. (2004). Human head exposure to a 37 Hz electromagnetic field: effects on blood pressure, somatosensory perception, and related parameters. *Bioelectromagnetics*, 25(3), 167-175. doi:10.1002/bem.10180
6. Cook, C. M., Saucier, D. M., Thomas, A. W., & Prato, F. S. (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*, 27(8), 613-627. doi:10.1002/bem.20247
7. Beischer, D. E. (1971). The null magnetic field as reference for the study of geomagnetic directional effects in animals and man. *Ann N Y Acad Sci*, 188, 324-330. doi:10.1111/j.1749-6632.1971.tb13107.x
8. Beischer, D. E., Miller II, E. F., & Knepton, J. C. (1967). Exposure of man to low intensity magnetic fields in a coil system (Vol. 1018): Naval Aerospace Medical Institute, Naval Aviation Medical Center.
9. Thoss, F., & Bartsch, B. (2007). The geomagnetic field influences the sensitivity of our eyes. *Vision Res*, 47(8), 1036-1041. doi:10.1016/j.visres.2007.01.022
10. Gurfinkel, Y. I., At'kov, O. Y., Vasin, A. L., Breus, T. K., Sasonko, M. L., & Pishchalnikov, R. Y. (2016). Effect of zero magnetic field on cardiovascular system and microcirculation. *Life Sci Space Res (Amst)*, 8, 1-7. doi:10.1016/j.lssr.2015.11.001
11. Гурфинкель, Ю. И., Васин, А. Л., Матвеева, Т. А., & Сасонко, М. Л. (2014). Оценка влияния гипомагнитных условий на капиллярный кровоток, артериальное давление и частоту сердечных сокращений. *Авиакосмическая и экологическая медицина*, 48, 24-30.
12. Демин, А. В., Суворов, А. В., & Орлов, О. И. (2021). Особенности гемодинамики у здоровых мужчин в гипомагнитных условиях. *Авиакосмическая и экологическая медицина*, 55, 63-68.
13. Kukanov, V. Y., Vasin, A. L., Demin, A. V., Schastlivtseva, D. V., Bubeev, Y. A., Suvorov, A. V., . . . Orlov, O. I. (2023). Effect of Simulated Hypomagnetic Conditions on Some Physiological Parameters under 8-Hour Exposure. *Experiment Arfa-19. Human Physiology*, 49(2), 138-146.
14. Бинги, В. Н. (2012). Два типа магнитных биологических эффектов: индивидуальный и групповой. *Биофизика*, 57, 338-345.
15. Binhi, V. N., & Sarimov, R. M. (2009). Zero magnetic field effect observed in human cognitive processes. *Electromagn. Biol. Med.*, 28(3), 310-315. doi:10.3109/15368370903167246
16. Саримов, Р. М., Бинги, В. Н., & Мияев, В. А. (2008). Влияние компенсации геомагнитного поля на когнитивные процессы человека. *Биофизика*, 53, 856-866.
17. Wand, M.P., Jones, M.C. (1994) Kernel smoothing. CRC press.
18. Rouaud, M. (2013) Probability, statistics and estimation. *Propagation of uncertainties*, 191, 1110.
19. Sarimov, R., Alipov, E. D., & Belyaev, I. Y. (2011). Fifty hertz magnetic fields individually affect chromatin conformation in human lymphocytes: Dependence on amplitude, temperature, and initial chromatin state. *Bioelectromagnetics*, 32(7), 570-579.

- doi:10.1002/bem.20674
20. Schüz, J., Petters, C., Egle, U. T., Jansen, B., Kimbel, R., Letzel, S., . . . Vollrath, L. (2006). The "Mainzer EMF-Wachhund": results from a watchdog project on self-reported health complaints attributed to exposure to electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics*, 27(4), 280-287. doi:10.1002/bem.20212
21. Binhi, V. N. (2021). Random Effects in Magnetobiology and a Way to Summarize Them. *Bioelectromagnetics*, 42(6), 501-515. doi:10.1002/bem.22359
22. Gegear, R. J., Foley, L. E., Casselman, A., & Reppert, S. M. (2010). Animal cryptochromes mediate magnetoreception by an unconventional photochemical mechanism. *Nature*, 463(7282), 804-807. doi:10.1038/nature08719
23. Kirschvink, J. L., Kobayashi-Kirschvink, A., Diaz-Ricci, J. C., & Kirschvink, S. J. (1992). Magnetite in human tissues: a mechanism for the biological effects of weak ELF magnetic fields. *Bioelectromagnetics*, Suppl 1, 101-113. doi:10.1002/bem.2250130710
24. Бинги, В. Н., & Чернавский, Д. С. (2005). Стохастический резонанс магнитосом, закрепленных в цитоскелете. *Биофизика*, 50, 684-688.
25. Binhi, V. (2008). Do naturally occurring magnetic nanoparticles in the human body mediate increased risk of childhood leukaemia with EMF exposure? *Int J Radiat Biol*, 84(7), 569-579. doi:10.1080/09553000802195323
26. Binhi, V. N. (2006). Stochastic dynamics of magnetosomes and a mechanism of biological orientation in the geomagnetic field. *Bioelectromagnetics*, 27(1), 58-63. doi:10.1002/bem.20178

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Статья Саримова Р.М. "Влияние гипомагнитных условий на размер зрачка человека" описывает результаты исследований по влиянию гипомагнитных условий проведенных автором с 40 испытуемыми. Работа в целом выполнена на хорошем экспериментальном уровне. Однако, восприятие статьи особенно в среде биологов будет нелегким, из-за излишнего переусложненной подачи достаточно простой и принятой процедуры нормировки результатов. Для улучшения восприятия статьи требуется внести следующие корректировки:

- 1) Дизайн эксперимента распределен по введению, материалам и результатам. Предлагаю подробнее описать дизайн в материалах, возможно с использованием таблицы или схемы.
- 2) Аббревиатуры ГМП и ГМУ близки друг к другу и трудно разделяются. Возможно, стоит придумать другой способ обозначения или не использовать аббревиатуры вовсе.
- 3) Описание формул нормировок в тексте и названий кривых в подписях на графиках излишне перегружено. Это затрудняет восприятие текста. Можно ли упростить описание простой по сути нормировки и перенести формулы в "Supplementary materials"? Формулы в тексте не пронумерованы и складывается ощущение, что нужны один раз. Кроме того, по тексту часть обозначений не используется, например в подписях осей графиков.
- 4) В тексте нет ни одного примера исходных динамических данных. С помощью рисунка с исходными данными можно было бы проиллюстрировать последовательность численной обработки результатов.
- 5) Первый и второй абзацы из результатов перенести в методы, т.к. они описывают нормировку и подготовку данных.
- 6) Не ясно, откуда взялись такие размеры массивов данных (стр. 6, 2 абзац в

"Результатах"), если это сваленные "в кучу" все данные по всем испытуемым, то какую нулевую гипотезу авторы проверяют? Можно ли такие наборы данных считать независимыми испытаниями при оценке достоверности отчий? Или же нужно сравнивать характеристические параметры для испытуемых?

7) Используемая нормировка на контроль обычна для биологических экспериментов, поэтому часть формул явно избыточна и затрудняет восприятие текста (стр. 6, 1 абзац в "Результатах")

8) Необходимо более подробное описание рисунков. Из описания рисунков не ясно что такое "Нормированные распределения индивидуальных магнитных эффектов" (рис. 4) или "Усредненная форма распределений индивидуальных магнитных эффектов (А) и распределение индивидуальных средних магнитных эффектов (Б)" (рис. 4)

9) Не ясно, в каком виде дано распределение на рис. 4, 5. По видимому, это функция оценки плотности. Не указан параметр сглаживания. Однаков ли он для разных распределений? Почему автор не использует функцию распределения? Привести ссылку на описание функции оценки плотности.

10) Подписи под осями на рисунках 2,4 и 5 сбивают. На рисунках 2,5 – это относительные единицы, на рисунке 4 – это проценты. Можно ли сделать стандартные шкалы на всех графиках?

11) Для рисунка 3 можно ли указать реальный размер зрачка в мм, а не в пикселях?

12) Для рисунка 4 можно ли кружками на кривых показать индивидуальные эффекты по испытуемым.

13) Авторы в обсуждении рассуждают о значении формы распределения данных. Для характеристики этой формы для распределений, близких к нормальным, принята оценка статистических моментов не только 1 (среднего) и 2го (дисперсии) порядка, но и 3-го (ассиметрии) и 4-го (эксцесса). Можно ли привести численные значения 1-4 статистических моментов распределения эффектов ГМУ для каждого испытуемого и для кривых на графике 5? Возможно, для моментов высших порядков авторы получат более существенные различия.

14) Вывод в предложении "Наши данные согласуются с идеей о том, что мишени МП более или менее равномерно распределены по организму человека" не обоснован, поскольку для этого надо подвергать действию магнитного поля разных частей организма человека и сравнивать эффекты.

Замечания главного редактора от 30 декабря 2023 года : "Все замечания рецензента автором учтены, необходимые поправки внесены в исправленные текст, загруженный в издательскую систему"