

ВЛИЯНИЕ КОМПЕНСАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА КОГНИТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ЧЕЛОВЕКА

© 2008 г. Р.М. Саримов, В.Н. Бинги, В.А. Миляев

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 119991, ул. Вавилова, 38

E-mail: rusa@kappela.gpi.ru

Поступила в редакцию 23.04.08 г.

Исследовано влияние компенсации геомагнитного поля до уровня менее 0,4 мкТл (далее «нулевое магнитное поле») на когнитивные процессы человека. В исследованиях участвовало 40 человек, разделенных на четыре группы по полу и возрасту. Тестировали когнитивные способности испытуемых. Каждый испытуемый принял участие в двух экспериментах: в контрольных условиях и в условиях нулевого магнитного поля. Пребывание в указанном поле в течение 45 мин вызывало статистически достоверные изменения в пяти из восьми измеряемых характеристик когнитивных тестов. Величина эффектов менялась от 1,3 до 6,2% и составила в среднем для всех тестов 2,1% ($p < 0,002$, MANOVA). Установлено, что в условиях нулевого магнитного поля по сравнению с контрольными условиями возрастало количество ошибок и увеличивалось время выполнения заданий. Мужчины выполняли задания в нулевом магнитном поле лучше, чем женщины, а молодые люди — лучше, чем пожилые. Показано наличие групп испытуемых по-разному реагирующих на нулевое магнитное поле, что не объясняется возрастными или гендерными различиями.

Ключевые слова: биологические эффекты магнитных и электростатических полей, биогенный магнетит, магниторецепция, цветовосприятие.

В последние годы появился ряд работ, в которых исследовалось влияние низкочастотных и постоянных магнитных полей (МП) на формирование биологического отклика нервной системы. Имеются обзоры, посвященные изучению влияния низкочастотных полей на электрофизиологические и когнитивные процессы человека [1,2]. В большинстве исследований наблюдали угнетение высшей нервной деятельности, выраженное в ухудшении кратковременной памяти и внимания [3], в замедлении скорости реакции [4,5] и изменении болевого порога [6,7]. Отмечены изменения ритмов головного мозга, в основном α -ритма [7,8].

Данные о влиянии постоянных магнитных полей на организм человека противоречивы. С одной стороны, принято считать, что постоянные МП в диапазоне до 8 Тл не влияют на здоровье [9] при длительности экспозиции порядка десятков минут. С другой стороны, существуют исследования, показывающие, что гораздо меньшие постоянные МП способны вызывать разнообразные биологические эффекты,

потенциально вредные для здоровья [10,11]. Экспозиция в поле с магнитной индукцией порядка геомагнитного поля и меньше также приводила к биологическим эффектам [12–14]. Противоречивость данных о влиянии постоянных МП на организм обусловлена, в частности, невысокой воспроизводимостью этих эффектов. Невоспроизводимость эффектов особенно ярко проявляется, когда результаты пытаются повторить в разных лабораториях. Причины недостаточно надежной воспроизводимости в магнитобиологических экспериментах остаются невыясненными. Часто предполагают, что не все физические факторы электромагнитной экспозиции, существенные для воспроизведения результатов, принимаются во внимание.

В нашей предыдущей работе [15] показано, что напряженность электростатического поля является важным фактором, влияющим на результат отклика испытуемого на изменение постоянного МП. Этому физическому фактору обычно не придают значения, однако электрические поля напряженностью в сотни вольт/метр приводят к эффектам того же порядка, что и эффекты слабых магнитных полей [16]. Поэтому они могут играть важную роль в формировании магнитобиологических эффектов. Такие электрические поля встречаются в

Сокращения: МП — магнитное поле, НМП — нулевое магнитное поле, ЭП — электростатическое поле, ANOVA — analysis of variance (дисперсионный анализ), MANOVA — multivariate analysis of variance (многомерный дисперсионный анализ).

неэкранированных лабораторных помещениях, и их величина и направление непредсказуемо меняются в зависимости от электризации пластиковых покрытий и погоды. В работе [17] показано, что биологический эффект нулевого магнитного поля (НМП) зависел от того, каким образом это поле было получено — с использованием металлического экрана или путем компенсации естественного геомагнитного поля при помощи противоположно направленного МП. Эту зависимость можно было бы объяснить влиянием электростатических полей на формирование эффектов НМП.

В настоящей работе основное внимание уделено биологическим аспектам невоспроизводимости, поскольку в предварительных исследованиях наблюдались большие разбросы в эффектах для испытуемых разных групп. Мы предположили, что преимущественное направление реакции испытуемого на НМП (увеличение или уменьшение измеряемого параметра) может быть обусловлено его принадлежностью к какому-либо выделенным физиологическим группам, разделенным по гендерным, возрастным или каким-то другим признакам. Так, эффекты НМП у женщин и у мужчин отличались как по величине, так и по направлению [15,18]. Авторы работ [19-21] также обнаружили, что пол испытуемых играет существенную роль в эффектах нетепловых электромагнитных полей. Важным признаком, влияющим на биологический эффект МП, может быть возраст испытуемых. Известно, что в организме человека с возрастом могут накапливаться эндогенные наночастицы магнетита и маггемита [22]. Такие частицы испытывают во внешнем МП механический вращательный момент, что может привести к усилению биологических эффектов МП и НМП у пожилых людей. Кроме того, имеются публикации о том, что некоторая часть населения может обладать гиперчувствительностью к электромагнитным воздействиям [23,24].

Цель данной работы состояла в проверке гипотезы о существовании физиологически выделенных групп людей, по-разному реагирующих на НМП.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Система экспозиции. Система экспозиции состояла из четырех кольцевых катушек диаметром 1 м с расстоянием между ними 0,5 м [18]. В крайних кольцах было 40 витков, в средних — 26,5. Общее активное электрическое сопротивление было равно 1,23 Ом. Неоднородность постоянного МП внутри системы не превышала 1 мкТл. Ось системы (ось Z) ори-

ентировали параллельно вектору геомагнитного поля в пределах доступной точности около 0,5°. Ослабление МП достигали путем создания МП, равного и противоположно направленного локальному геомагнитному полю величиной около 44 мкТл. Во время экспериментов производили измерение и запись МП внутри системы с интервалом, равным 1 мс по каждой из трех осей, с помощью одноосных датчиков FGM-3 (Spreake & Co). С помощью четвертого датчика, параллельного оси Z, была реализована активная компенсация флуктуаций локального МП. Система компенсировала с частотой 10 Гц изменения Z-составляющей магнитного поля. Изменения МП внутри установки в ходе эксперимента не превышали $\pm 0,4$ мкТл для осей Z (рис. 1) и X и $\pm 0,6$ мкТл для оси Y. МП контролировали с помощью измерителя магнитной индукции ТМИ-01 (ИОФ РАН) с точностью около 100 нТл.

Вдоль поверхности системы был установлен электростатический экран в виде сетки из медной проволоки без замкнутых контуров с размером ячейки около 3 см. Расчетный коэффициент ослабления электростатического поля (ЭП) внутри системы превышал 100. Внутри системы, две вертикально закрепленные сетки размером 60 × 60 см, расположенные на расстоянии 60 см друг от друга, с размером ячейки 1 см, позволяли создавать в месте расположения головы испытуемого контролируемое электростатическое поле. Во всех экспериментах использовали горизонтальное ЭП величиной 100 В/м.

Условия проведения эксперимента. В эксперименте приняли участие 40 человек. Все участники этого эксперимента были разделены на четыре группы по 10 человек в каждой: молодые мужчины не старше сорока лет, средний возраст 23,6 г.; молодые женщины — 26,3 г., пожилые мужчины — 53,1 г. и пожилые женщины — 49,2 г.

Интервал времени проведения отдельного эксперимента с одним испытуемым, равный 1 ч 17 мин, был разбит на семь равных подинтервалов по 11 мин (серий). В первой серии испытуемый адаптировался к тестам (11 мин). Во второй и третьей сериях, испытуемый выполнял задания по-прежнему в неизменных условиях для определения индивидуальных референсных значений измеряемых величин (22 мин). Наконец, в четвертой-седьмой сериях (44 мин) испытуемый в течение эксперимента либо продолжал находиться в контрольных условиях (Sham), когда МП было примерно равно геомагнитному полю, $41,5 \pm 0,4$ мкТл, либо в

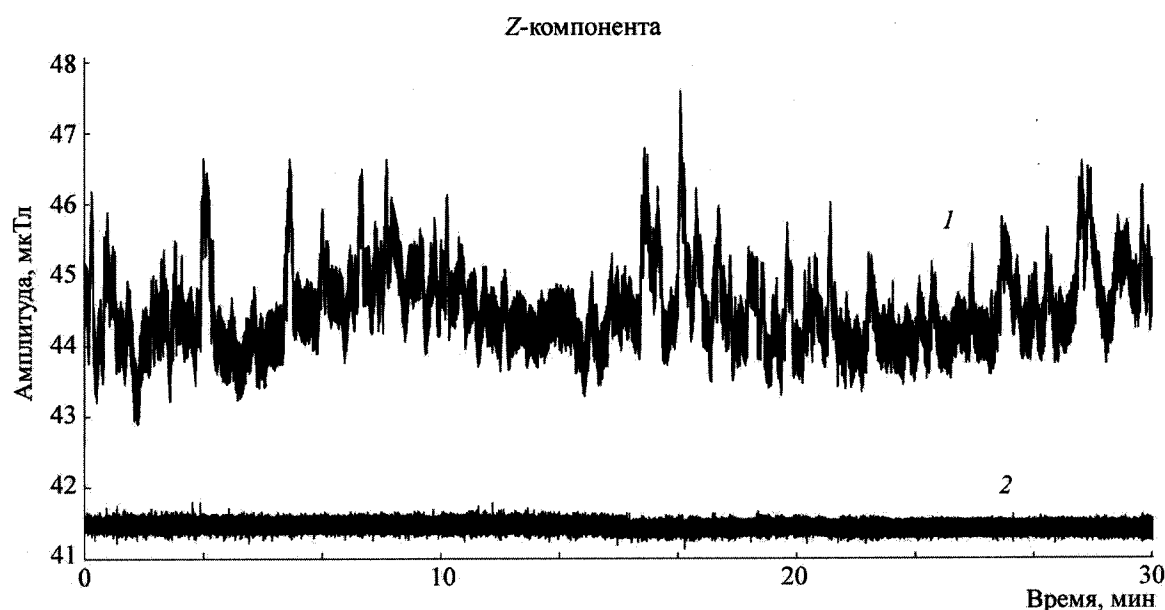


Рис 1. Изменение МП в лаборатории в 30-минутном временном интервале; 1 — запись типичных вариаций МП; 2 — запись МП $41,5 \pm 0,4$ мкТл при активной компенсации флуктуаций в низкочастотной области; соответствует контрольным условиям и режиму Sham в экспериментах.

условиях НМП. Участники экспериментов* были подобраны таким образом, чтобы можно было исследовать гендерную и возрастную зависимость эффектов НМП.

В течение эксперимента испытуемые выполняли тесты, в которых измерялись параметры когнитивных процессов в центральной нервной системе. Измеряли: 1) скорость реакции; 2) время распознавания цветных слов; 3) параметры теста кратковременной памяти на цвет; 4) параметры теста на образное мышление человека. В каждой серии испытуемый поочередно выполнял все четыре теста. Испытуемый не знал, в каких условиях проходило тестирование, в контрольных Sham или в условиях НМП. Общие условия проведения всех экспериментов соответствовали обычным условиям офисного рабочего помещения площадью 40 м² с двумя-четырьмя сотрудниками. Никаких мер по созданию специального режима освещения и тишины в лаборатории не предпринималось.

Каждый испытуемый участвовал в двух экспериментах; второй эксперимент проводили через 40–60 дней после первого. Все участники экспериментов случайно делились на две большие группы, «Альфа» и «Бета». Испытуемые группы «Альфа» участвовали в первом из двух экспериментов в условиях Sham, а во втором в условиях НМП. Испытуемые группы «Бета», наоборот, участвовали в первом эксперименте

в условиях НМП, а втором в условиях Sham.

Тестирование. В тесте на измерение скорости простой двигательной реакции испытуемому на экране монитора в случайном месте предъявлялось изображение черного круга диаметром 50 пикселей, внутри круга размещалось изображение серого креста размером 8 пикселей. Изображение следующего круга появлялось сразу после исчезновения предыдущего. Время предъявления изображения круга уменьшалось от 1 с до 300 мс. Иногда с вероятностью 0,4 круг появлялся с красным крестом. Задание состояло в том, чтобы испытуемый быстро отреагировал на изображение круга с красным крестом. В ходе эксперимента измеряли промежуток времени t между предъявлением изображения с красным крестом и двигательной реакцией испытуемого, а также определяли количество правильных ответов. Процент правильных ответов определяли как отношение числа правильных реакций к общему числу заданий с красным крестом. В среднем для каждой серии проводили около $i = 60$ предъявлений задания.

Тест на соответствие смысла слова и его цвета был разработан на основе известного теста, предложенного Дж. Струпом в 1935 году [25]. В отличие от оригинального теста, где испытуемому предъявлялся список слов с обо-

*Все участники дали добровольное «информированное согласие» на участие в экспериментах по протоколу, утвержденному комиссией по этике научных исследований ИОФ РАН.

значением цветов, мы предъявляли одно слово, в виде сокращенного названия цвета (КРА, ЗЕЛ, СИН, ЖЕЛ). Причем буквы иногда представляли в нормальном, а иногда в горизонтально инвертированном виде. Цвет изображения также случайно выбирали из четырех основных тонов (красный, зеленый, синий, желтый). Время предъявления рисунка с указанными надписями составляло 2 с. За это время испытуемому надо было с помощью мыши нажать на одну из клавиш, расположенных на экране монитора: «+», если смысл слова совпадал с цветом и «-», если не совпадал. В данном тесте измеряли время ответа и количество ошибок. Если испытуемый за отведенное время не успевал нажать на клавишу с ответом, ответ считался ошибочным. Для каждой серии проводилось $i = 32$ задания.

Тест на кратковременную цветовую память.

Тестирование проходило следующим образом. На экране монитора появлялось монохромное изображение квадрата со стороной 1024 пикселей. Цвет задавали случайно из 16 миллионов возможных сочетаний отдельных цветовых компонентов с интенсивностями от 0 до 255. Изображение демонстрировали в течение 1 с. Далее испытуемому в течение 2 с показывали серый фон, а затем изображение квадрата, окраска которого была уже не монохромной, а представляла собой спектр цветов. Спектр демонстрировали в течение 3 с. За это время испытуемому надо было найти и указать в спектре цвет первоначального монохромного изображения. В тесте фиксировали разницу, далее по тексту — ошибку между первоначальным цветом и цветом, указанным испытуемым. Ошибку определения цвета S вычисляли по формуле: $S = (r^2 + g^2 + b^2)^{1/2}$, где r , g и b — разности интенсивностей красного, зеленого и синего цветовых компонентов монохромного изображения и цвета в спектре. Параллельно в тесте проводили измерения времени, затраченного на определение и указание цвета. В каждой серии проводили $i = 50$ измерений ошибки указания цвета и времени ответа.

Заметим, что цветовосприятие монохромного изображения отличается от восприятия этого же цвета в спектре из-за наличия рецептивных «on» и «off» зон в сетчатке глаза и в областях первичной обработки зрительной информации. При возбуждении зон «on» происходит угнетение восприятия, для зон «off» — наоборот [26]. Поэтому изменение ошибки определения цвета под действием различных факторов может быть связано с изменением цветовосприятия. Однако поскольку монохромное изображение и спектр предъявлялись в одинаковых условиях, а полу-

ченные данные нормированы на индивидуальные референсные величины, то изменение относительной ошибки в определении цвета мы связываем с изменениями в цветовой памяти испытуемого, т.е. в способности запоминать и сохранять в кратковременной памяти цветовые ощущения. В ранних экспериментах [15] предъявление спектра следовало непосредственно за монохромным заданием. В этом случае процесс нахождения цвета мог быть связан не с кратковременной памятью, а с изменениями в распознавании или даже с интерференцией искомого цвета и спектра. Для полной уверенности в том, что измеряемый параметр связан именно с кратковременной памятью, мы ввели временной лаг между предъявлением монохромного изображения и спектра. После установки временного лага в 2 с ошибки в определении цвета увеличились на 20% (14 испытуемых, 14000 испытаний)

Тест на идентификацию букв являлся модификацией известного теста Р. Шепарда [27]. Тест Шепарда используется для исследования образного мышления человека и состоит в оценке правильности распознавания букв. Буквы демонстрируются либо в стандартном виде, либо в зеркально отраженном виде. Одновременно буква может быть наклонена под углом, кратным 45 градусам. Испытуемому надо нажать на одну клавишу, если буква показана в стандартном, т.е. возможно наклоненном, но не зеркальном варианте, и на другую клавишу, если буква показана в зеркальном варианте. Известно, что образное мышление человека при распознавании букв использует не языковую систему, а систему, связанную с графическим распознаванием [28]. Наша модификация состояла в том, что испытуемому на экране монитора демонстрировали сразу две буквы. Одни из демонстрируемых букв были «Б», «Г», или «Ч», другие — их зеркальным отражением. Пара одинаковых букв (в стандартном изображении и зеркальном) одновременно была повернута относительно вертикального положения под углом, кратным 45 градусам. Задача испытуемого состояла в том, чтобы быстро найти букву в стандартном варианте и, используя указатель, нажать на экране монитора на клавишу «ЛЕВ», если она находилась слева, или «ПРАВ», если справа. В данном тесте измеряли время ответа и количество ошибок. Если испытуемый за 3 с не успевал нажать на клавишу, то ответ считали ошибочным. В каждой серии испытуемый выполнял данный тест 24 раза.

Смысл использованных модификаций тестов Струпа и Шепарда состоял в том, чтобы, не увеличивая значительно времени выполнения

заданий, усложнить задачу и добиться уровня ошибок приблизительно в половине случаев. Это позволяет существенно поднять точность измерения параметров этих тестов.

Нормирование результатов. Во время проведения эксперимента результаты тестирования непрерывно улучшались вследствие обучения испытуемых. В тесте на соответствие смысла слова и его цвета и в тесте на идентификацию букв это было особенно заметно. Процент ошибок в последнем тесте уменьшался с 35% в начале первого эксперимента до 15% в конце второго. В тестах на скорость реакции и на кратковременную память на цвет эффект обучения был меньше. В условиях таких трендов исследовать действие факторов, вызывающих лишь небольшой биологический эффект, затруднительно. Поэтому измеряемые величины во всех тестах, как в условиях Sham, так и в условиях НМП, т.е. в интервале с четвертой по седьмую серию, нормировали для каждого испытуемого на его индивидуальные референсные значения, выявляемые в интервале со второй по третью серии. Таким образом, ошибки и время ответов при тестировании нормировали следующим образом:

$$e_{ijm} \equiv \text{ошибка}_{ijm} / \langle \text{ошибка} \rangle_m,$$

$$t_{ijm} \equiv \text{время}_{ijm} / \langle \text{время} \rangle_m$$

где i — номер измерения; j — номер серии; m — вид теста; $\langle \rangle$ — усредненный результат по двум референсным сериям — второй и третьей. Такое нормирование особенно эффективно, когда эксперименты проводят с разными испытуемыми и в разные дни, поскольку референсные значения меняются также и в зависимости от физиологического состояния испытуемого. В случае определения нормированных значений ошибок во всех тестах, кроме теста на цветовую память, номер измерения i принимал единственное значение, т.е. для каждой серии в данных тестах в статистическом анализе использовали только одно значение — процент правильных ответов в серии. В тесте на цветовую память, как указано выше, число измерений ошибок и времен ответа равнялось 50, поэтому для этого теста $i = 1..50$.

Статистическую обработку результатов проводили тремя методами. Для первичной оценки эффектов НМП отдельно для каждого измеряемого параметра использовали t -тест Стьюдента. Нормальность распределения параметров проверяли с помощью критерия Колмогорова–Смирнова. Однородность дисперсий проверяли с помощью критерия Левена. Размер выборок для групп Sham и НМП варьировали

от 160 до 7800 в зависимости от измеряемого параметра (рис. 2).

Для оценки вкладов различных факторов в измеряемые величины использовали многомерный дисперсионный анализ MANOVA (Multivariate analysis of variance). Основной целью дисперсионного анализа является оценка статистической значимости различия между средними по выборкам, или группам, где группы, возможно, отличаются в силу действия того или другого фактора, например магнитного поля. MANOVA, в отличие от одномерного дисперсионного анализа ANOVA, позволяет оценить значимость эффектов при действии различных факторов по измеренным значениям сразу нескольких переменных величин. В настоящей работе это были измеряемые параметры нескольких когнитивных тестов.

Основным исследуемым фактором, который мог повлиять на результаты измерений, был фактор электромагнитных условий (фактор «ЭМ»), в соответствии с которым всех испытуемых можно было разделить на две группы: тестируемые в условиях Sham или НМП. Помимо основного фактора, учитывалось возможное действие и некоторых других факторов. Такими сопутствующими факторами были: пол испытуемого, далее фактор «Пол»; возраст испытуемого — фактор «Возраст»; интервал времени, соответствующий одной из серий с четвертой по седьмую — фактор «Время»; принадлежность к группе Альфа или Бета по порядку прохождения экспериментов в условиях НМП и Sham — фактор «Порядок». Таким образом, в MANOVA оценивали возможные вклады в измеряемые величины со стороны пяти факторов:

ЭМ — две группы, Sham и НМП;

Возраст — две группы, старше и моложе 40 лет;

Пол — две группы, мужчины и женщины;

Время — четыре группы, соответствующие сериям с четвертой по седьмую;

Порядок — две группы, по порядку экспериментов Sham и НМП.

Измеряемых величин было восемь — время ответа и ошибка для каждого из четырех тестов. В дисперсионном анализе измеряемые величины усредняли для каждой серии и каждого теста следующим образом:

$$E_{jm} \equiv \langle e_{ijm} \rangle, T_{jm} \equiv \langle t_{ijm} \rangle.$$

Далее, результаты каждого из 80 экспериментов (40 испытуемых по два эксперимента) заносили в таблицу. Первые пять столбцов таблицы содержали значения независимых груп-

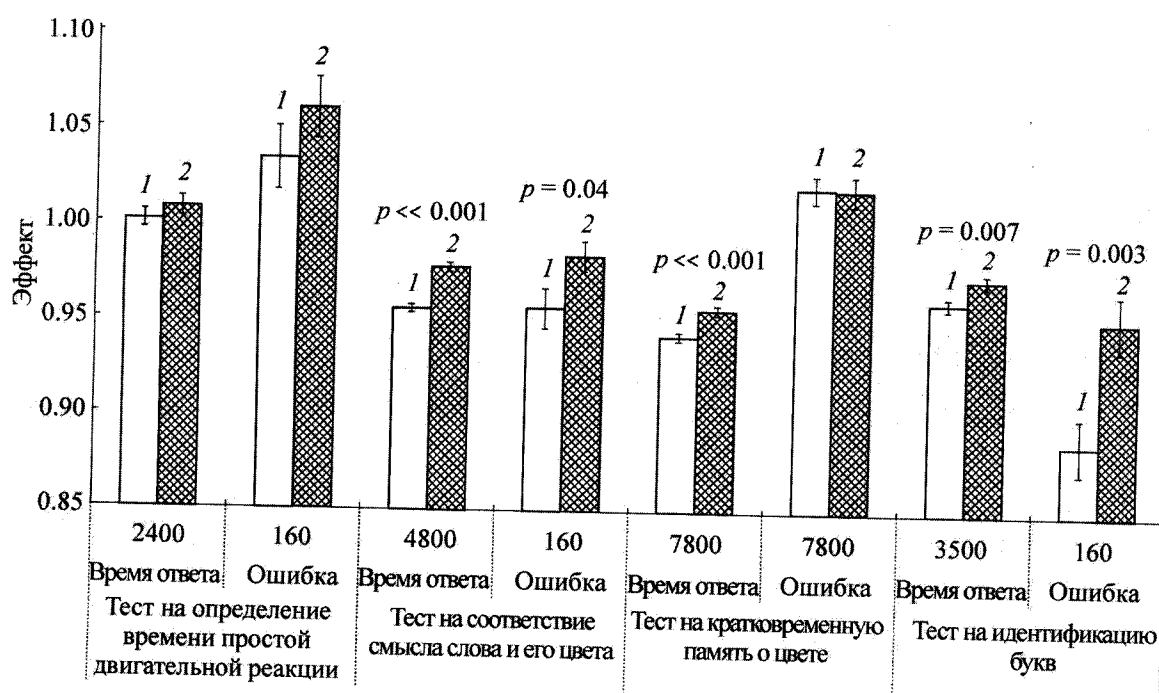


Рис 2. Эффекты четырех тестов: по два измеряемых параметра в каждом для 40 испытуемых, полученные в условиях: 1 – Sham (41,5 мкТл) и 2 – НМП (<0,4 мкТл): $E_m^{(НМП)}$, $E_m^{(Sham)}$ — ошибки, $T_m^{(НМП)}$, $T_m^{(Sham)}$ — время ответа, где $E_m \equiv \langle E_{jmn} \rangle$, $T_m \equiv \langle T_{jmn} \rangle$, j — номер серии, m — вид теста, n — порядковый номер испытуемого. Над столбцами показаны уровни значимости, полученные с помощью t -теста. Под обозначениями теста показаны объемы выборок для каждой группы ($i \times j \times n$). В качестве погрешности приведена стандартная ошибка среднего.

пирующих переменных, или уровни соответствующих факторов, т.е. определяли групповую принадлежность эксперимента в отношении указанных факторов. Следующие восемь столбцов содержали зависимые переменные — усредненные по i нормированные времена и ошибки. Результаты каждого эксперимента занимали четыре строки — по числу серий, или уровней фактора «Время». Таким образом, дисперсионному анализу подвергались 2560 ($80 \times 8 \times 4$) величин. При анализе вкладов факторов в один какой-либо измеряемый параметр число анализируемых величин, или размер выборки, было в восемь раз меньше, т.е. 320.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В целом тестирование в условиях НМП по сравнению с тестированием в условиях Sham сопровождалось ростом числа ошибок и увеличением времени ответа (рис. 2). Для пяти из восьми измеряемых параметров эффекты были статистически значимыми (t -тест). Величина статистически значимых эффектов менялась от 1,3 до 6,2%.

Дисперсионный анализ показал, что фактор «Время» не взаимодействует с фактором «ЭМ», т.е. величина эффектов НМП значимо не за-

висит от номера серии наблюдений. Поэтому далее фактор «Время» в дисперсионный анализ не включали. Эффекты и взаимодействия остальных факторов, результаты дисперсионного анализа, приведены в табл. 1.

Результаты тестов для групп Sham и НМП были статистически значимо различны, с уровнем значимости $p < 0,001$. Общий эффект ну-

Таблица 1. Результаты многомерного дисперсионного анализа: статистическая значимость различия групп, разделенных соответствующим фактором

Фактор	λ Уилкса	p
ЭМ	0,916	0,00093
Возраст	0,868	0,000001
Пол	0,925	0,003
Порядок	0,853	0,000000
ЭМ $\times$ Возраст	0,965	0,22
ЭМ $\times$ Пол	0,956	0,099
ЭМ $\times$ Порядок	0,937	0,012
ЭМ $\times$ Возраст $\times$ Пол	0,938	0,013

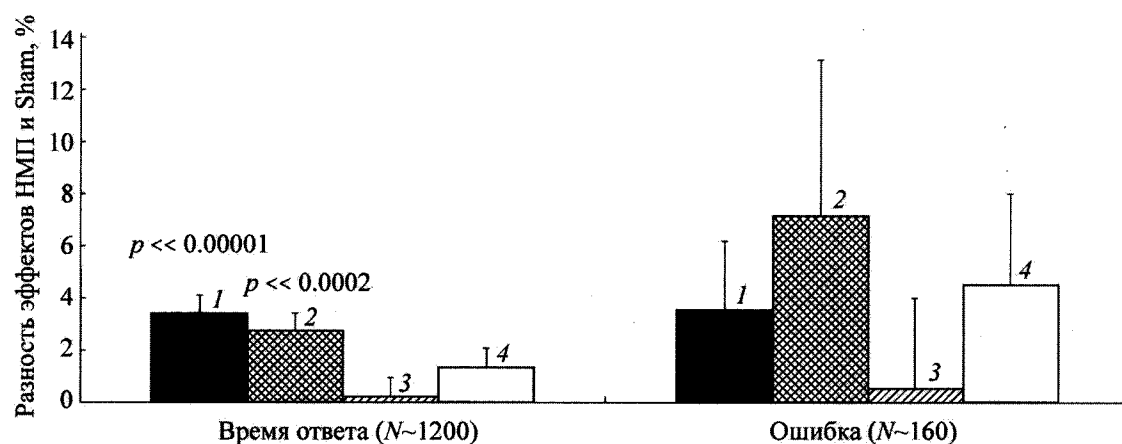


Рис 3. Разности эффектов НМП и Sham в тесте на соответствие смысла слова и его цвета (среднее для 40 человек) для заданий с разными цветами: 1 – красным; 2 – желтым; 3 – зеленым; 4 – синим. Под обозначениями тестов показаны объемы выборок для каждой группы $N = ijn$. В качестве погрешности отложена стандартная ошибка среднего.

левого МП в различных группах характеризует разность эффектов НМП и Sham; она, очевидно, учитывает влияние всех возможных неучтенных факторов. Для всех тестов разность эффектов НМП и Sham составляла от 0,1 до 6,4%, средняя величина 2,1% (табл. 2).

По результатам MANOVA эффекты НМП при выполнении тестов испытуемыми из групп Альфа и Бета (взаимодействие факторов ЭМ × Порядок) статистически значимо различались ($p = 0,012$). При этом усредненные по всем тестам эффекты НМП для испытуемых группы Альфа почти в два раза превышали эффекты группы Бета (2,7 и 1,5% соответственно, табл. 2). Видно также, что такие параметры, как время ответа в тесте на определение скорости реакции и ошибка в тесте на кратковременную цветовую память, больше зависели от опыта прохождения тестов, чем от условий, в которых тесты проводились. Ошибка в тесте на идентификацию букв также сильно зависела от группы. Разность эффектов НМП и Sham для испытуемых группы Альфа составила 9,8%, для группы Бета — 3,1%. Для остальных пяти параметров различия между группами Альфа и Бета были незначительными и не превышали 1,5% (табл. 2). Различия между группами Альфа и Бета увеличили погрешность оценки эффектов НМП и Sham, однако существенного вклада в статистику не внесли. Наблюдаемая разность эффектов НМП в группах Альфа и Бета не могла повлиять на эффекты в группах, в которые входили мужчины, женщины, молодые и пожилые, поскольку в каждой из этих групп было равное число испытуемых из групп Альфа и Бета.

Эффекты НМП и Sham при тестировании испытуемых, включенных в группы, разделен-

ные по полу и возрасту, значимо не отличались, поскольку взаимодействие факторов ЭМ×Возраст и ЭМ×Пол было статистически незначимо, $p > 0,05$. В то же время взаимодействие ЭМ×Возраст×Пол было значимо, $p \sim 0,01$, и средние по всем тестам эффекты НМП для молодых и пожилых мужчин составили 0,6 и 2,2%, для молодых и пожилых женщин — 3,5 и 2,1% соответственно (табл. 2).

Для 15 человек из 40 средний по тестам эффект Sham был больше чем НМП, т.е. в условиях НМП эти испытуемые совершали меньше ошибок и выполняли тесты быстрее, чем в условиях Sham. Средний эффект для них составил -3,6%, знак «-» указывает на то, что эффекты Sham больше эффектов НМП. 25 из 40 испытуемых выполняли тесты в условиях НМП хуже, чем в Sham. Средний по тестам эффект для них составил 5,6%, причем у 5 из 40 испытуемых (12,5%) такое ухудшение было наиболее ярко выражено — средний по всем тестам эффект НМП для них превысил 8%.

В тесте на соответствие смысла слова и цвета была обнаружена закономерность, связанная с цветом (рис. 3). Так, время ответов испытуемых, находившихся в условиях НМП при определении синего и зеленого цветов, значимо не отличалось от времени ответов в условиях Sham. Однако при тестировании желтого и красного цветов разница времен была значимой. Наблюдалось 3-процентное замедление ответов. Также фиксировалось увеличение ошибок, однако количество наблюдений не позволило установить их статистическую значимость. Результаты, полученные в данном тесте, интересно сопоставить с результатами, полученными в работе [29], где наблюдали дезориентацию птиц при освещении

Таблица 2. Средние по группам разности эффектов НМП и Sham в процентах

Группы	Размер выборки для каждого теста	Тест на определение времени простой двигательной реакции		Тест на соответствие смысла слова и его цвета		Тест на кратковременную память о цвете		Тест на идентификацию букв		Среднее по всем тестам
		время ответа	ошибка	время ответа	ошибка	время ответа	ошибка	время ответа	ошибка	
Все	320	0,6 ± 0,9	2,5 ± 2,4	1,9 ± 0,6	2,6 ± 1,0	1,5 ± 0,8	0,1 ± 1,4	1,1 ± 0,7	6,4 ± 2,1	2,1
Альфа	160	-1,2 ± 1,6	3,0 ± 5,4	2,1 ± 1,3	1,4 ± 1,7	0,9 ± 1,5	4,5 ± 2,6	0,8 ± 1,3	9,8 ± 3,8	2,7
Бета	160	2,3 ± 1,9	2,1 ± 4,1	1,8 ± 1,2	3,7 ± 2,4	2,1 ± 1,7	-4,3 ± 2,8	1,4 ± 1,4	3,1 ± 4,5	1,5
Молодые	160	1,9 ± 1,8	1,9 ± 5,3	2,3 ± 1,4	0,4 ± 1,9	2,6 ± 1,6	0,6 ± 2,8	1,5 ± 1,4	4,9 ± 3,8	2,0
Пожилые	160	-0,8 ± 1,7	3,2 ± 4,1	1,5 ± 1,1	4,8 ± 2,0	0,5 ± 1,7	-0,4 ± 2,7	0,8 ± 1,3	7,9 ± 4,6	2,2
Мужчины	160	-1,3 ± 1,7	1,2 ± 4,4	1,6 ± 1,2	1,7 ± 2,1	2,4 ± 1,7	1,5 ± 2,5	1,6 ± 1,3	2,5 ± 4,0	1,4
Женщины	160	2,4 ± 1,8	3,9 ± 5,1	2,2 ± 1,3	3,5 ± 2,0	0,6 ± 1,6	-1,3 ± 2,9	0,6 ± 1,3	10,4 ± 4,3	2,8
Молодые мужчины	80	-1,6 ± 2,3	-2,2 ± 6,5	2,3 ± 1,9	-3,8 ± 2,1	3,9 ± 2,6	0,5 ± 3,8	1,7 ± 1,8	3,6 ± 4,3	0,6
Молодые женщины	80	5,4 ± 2,7	6,0 ± 8,3	2,4 ± 2,0	4,6 ± 3,0	1,2 ± 1,9	0,6 ± 4,1	1,2 ± 2,0	6,3 ± 6,4	3,5
Пожилые мужчины	80	-1,0 ± 2,6	4,6 ± 5,9	1,0 ± 1,4	7,2 ± 3,3	0,8 ± 2,2	2,5 ± 3,4	1,4 ± 1,8	1,4 ± 6,7	2,2
Пожилые женщины	80	-0,6 ± 2,3	1,7 ± 5,5	2,0 ± 1,6	2,4 ± 2,4	0,1 ± 2,5	-3,3 ± 4,0	0,1 ± 1,6	14,4 ± 5,7	2,1

Примечания. Ошибки $E_m^{(НМП)} - E_m^{(Sham)}$ и времена ответов $T_m^{(НМП)} - T_m^{(Sham)}$, где $E_m = \langle E_{jmn} \rangle$, $T_m = \langle T_{jmn} \rangle$, j — номер серии, m — вид теста, n — порядковый номер испытуемого. Знаки «+» и «-» показывают увеличение и уменьшение ошибок и времени ответов при прохождении тестов в НМП. В качестве погрешности приведены стандартные ошибки средних.

их оптическим излучением желто-красного диапазона.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты MANOVA показали, что при изучении эффектов НМП и, возможно, эффектов слабых ЭМП в общем, пол и возраст ис-

пытуемых должны учитываться одновременно, поскольку каждый из этих факторов меняет характер воздействия другого фактора на эффект МП. Порядок прохождения тестов также имеет значение с учетом обучаемости испытуемых: магнитный эффект был почти вдвое больше, когда тестированию в НМП подвергался испытуемый, уже обученный в предшествующих

шем Sham эксперименте. Это могло бы быть объяснено тем, что необученный испытуемый совершает больше ошибок по неопытности, и ошибки, вызванные действием НМП, тогда менее заметны.

Результаты тестов в НМП для мужчин схожи с полученными нами ранее данными [15]. Среднее изменение четырех исследуемых параметров для мужчин в предварительных экспериментах равнялось 1,8%, а в настоящей работе 1,4%. Тесты, показавшие незначимые эффекты НМП в предыдущей работе, в данном исследовании также показали аналогичные результаты. Например, в тесте на время простой двигательной реакции, как и в предварительных исследованиях, эффекты были минимальными. Большие эффекты для женщин, до 20%, наблюдавшиеся нами в предыдущей работе, скорее всего, обусловлены малой выборкой (три человека в группе), а также тем обстоятельством, что испытуемые для групп НМП и контроля были разными и специально по возрасту не подбирались.

В силу известных трудностей экспериментальных исследований влияния ЭМП на человека маловероятно, что число испытуемых в одном цикле экспериментов превысит 30 – 50 человек. Но столь малые выборки недостаточны для надежных выводов на основе сопоставления средних величин. Поэтому при обработке результатов таких исследований следует обращать внимание не только на величину среднего по группе эффекта или статистическую значимость, но и на характер распределения испытуемых по их чувствительности к МП, поскольку простые процедуры усреднения могут дать близкие к нулю значения. Интересно, что даже при таком «невыгодном» усреднении при наличии групп испытуемых, противоположно реагирующих на НМП, наши опыты все же показывают статистически значимый эффект НМП.

Дисперсионный анализ не выявил влияния фактора «Время» на эффекты фактора ЭМ: эффекты НМП не зависели от номера серии, каждая из которых длилась 11 мин. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что эффект НМП развивается в течение не более нескольких минут. В свою очередь, это указывает на возможные механизмы действия слабых МП, ограниченные необходимостью сравнительно быстро вызывать существенные изменения в нервной системе. Это наблюдение не противоречит предположению о важной роли мозга в рецепции слабых МП человеком.

Известна гипотеза о природе магнитобиологических эффектов, согласно которой пер-

вичная рецепция МП осуществляется магнитными наночастицами [30]. Теоретически нелинейная стохастическая динамика таких частиц обеспечивает чувствительность к вариациям МП порядка десятых долей мкТл [31]. Магнитные наночастицы образуются в организмах из ферригидрита белка ферритина, либо попадают в организм извне. В таком случае было бы интересно сопоставить группы людей с максимальными эффектами МП, с группами людей, обладающих повышенным естественным содержанием магнитных наночастиц. Измерение содержания магнитных наночастиц в организме человека представляет сложную задачу. Известна оценка концентрации таких частиц в мозге человека, от 10 до 100 нг/г для разных участков мозга, с помощью сквид-магнитометра *in vitro* [32]. Трудность состоит в том, что измерение магнитосом в мозге возможно лишь *post mortem*, а для оперативного измерения естественного содержания магнитных наночастиц в крови методы еще не разработаны.

Интересно сопоставить данные когнитивных тестов с концентрацией магнитосом в тех участках мозга, которые ответственны за выполнение задач в данных тестах. В работе [32] показано, что содержание магнитосом в мозжечке меньше, чем в остальных разделах мозга, и составляет примерно 10–15 нг/г, тогда как в гиппокампе или коре головного мозга оно практически достигает 100 нг/г. Можно было бы предположить, что и магнитные эффекты в тестах, вовлекающих функции мозжечка, будут меньше. Действительно, эффекты в тесте на скорость реакции были минимальны по сравнению с эффектами в других тестах.

Другой часто обсуждаемый механизм магнитобиологических эффектов основан на зависимости некоторых реакций с участием радикальных пар от величины МП. Главным образом такая зависимость возникает в относительно сильных МП 0,01–10 Тл [33]. Однако в теоретических исследованиях указывают на такие свободно-радикальные фотохимические реакции, в которых слабые МП, порядка геомагнитного поля ~ 50 мкТл, могли бы вызывать заметные эффекты. В работе [34] таким образом объясняются эксперименты с дезориентацией птиц при освещении светом с длиной волны более 590 нм [35]. В наших экспериментах, в тесте на соответствие смысла слова и его цвета, наблюдалось появление магнитного эффекта только в заданиях с желтым и красным цветом: можно было бы предположить вовлеченность магниточувствительной фотохимической реакции.

В целом объем полученных данных недостаточен, чтобы подтвердить или опровергнуть вовлеченность в магниторецепцию магнитных наночастиц, либо реакций с участием радикальных пар. Интересно, что разделение этих двух гипотетических механизмов может вообще оказаться невозможным. Как указано в работе [36], собственные МП магнитных наночастиц размером 10–100 нм вблизи частиц на два – четыре порядка больше, чем геомагнитное поле, и достигают величин около 0,2 Тл. Поэтому присутствие магнитных наночастиц в организме существенно меняет скорости радикально-парных реакций, протекающих вблизи наночастиц [37].

Представленные результаты относятся к конкретному режиму магнитной экспозиции — НМП. Однако, очевидно, что компенсацию геомагнитного поля можно рассматривать и как влияние изменения постоянного МП на организм. В этом смысле интересно предположить, что найденные нами закономерности, в частности, существование групп людей, по-разному реагирующих на НМП, могли бы проявляться и в более общем случае влияния слабых постоянных МП на когнитивные процессы.

Полученные в данной и в предыдущих работах [15,18] результаты подтверждают эффекты влияния слабых МП на когнитивные процессы человека. Величина эффектов при усреднении для группы из сорока человек составила несколько процентов, хотя эффекты для отдельных групп людей в НМП превышали 10% (табл. 2). По-видимому, столь большой разброс, как в величине эффектов НМП, так и в направленности, связан не только с дисперсией измеряемого когнитивного параметра, но и с разной чувствительностью испытуемых к воздействию слабых МП, включая изменение знака магнитного эффекта. Поэтому отмеченная в литературе невысокая воспроизводимость магнито-биологических экспериментов с участием людей обусловлена, скорее всего, эффектом выборки, т.е. малостью выборки, обычно в несколько десятков человек. При таком объеме выборки получить воспроизводимые статистически значимые различия для эффектов слабых МП сложно: вклад отдельного человека, восприимчивого к экспозиции в слабом МП или же наоборот невосприимчивого, может оказаться решающим.

ВЫВОДЫ

По результатам тестирования 40 испытуемых установлено, что НМП вызывает увеличение количества ошибок и увеличение времени

выполнения заданий в когнитивных тестах. Количество ошибок в среднем увеличивалось на 2,9%, время выполнения заданий в среднем увеличивалось на 1,4%.

Женщины в условиях НМП выполняли задания хуже, чем мужчины. Средний по всем тестам эффект для женщин 2,8%, для мужчин 1,4%.

Возрастные различия в эффектах НМП также были обнаружены, однако они были менее выражены по сравнению с гендерными различиями. Средний по всем тестам эффект для молодых испытуемых составил 2,0%, для пожилых — 2,2%.

Показано, что у 25 испытуемых из 40 в условиях НМП показатели когнитивных тестов ухудшались, у 15 — улучшались. У 5 из 40 испытуемых (12,5%) такое ухудшение было наиболее ярко выражено — средний по всем тестам эффект НМП для них превысил 8%. Наличие групп испытуемых, разнонаправленно реагирующих на НМП, не объясняется возрастными или гендерными различиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. M. Cook, A. W. Thomas, and F. S. Prato, *Bioelectromagnetics* 23 (2), 144 (2002).
2. C. M. Cook, D. M. Saucier, A. W. Thomas, and F. S. Prato, *Bioelectromagnetics* 27 (8), 613 (2006).
3. A. W. Preece, K. A. Wesnes, and G. R. Iwi, *Int. J. Radiat. Biol.* 74 (4), 463 (1998).
4. J. Podd, J. Abbott, N. Kazantzis, and A. Rowland, *Bioelectromagnetics* 23 (3), 189 (2002).
5. C. J. Whittington, J. V. Podd, and B. R. Rapley, *Bioelectromagnetics* 17 (2), 131 (1996).
6. N. M. Shupak, F. S. Prato, and A. W. Thomas, *Neurosci. Lett.* 363 (2), 157 (2004).
7. S. Ghione, C. D. Seppia, L. Mezzasalma, and L. Bonfiglio, *Neurosci. Lett.* 382 (1-2), 112 (2005).
8. C. M. Cook, A. W. Thomas, L. Keenlislade, and F. S. Prato, *Bioelectromagnetics* 26 (5), 367 (2005).
9. D. W. Chakeres and F. de Vocht, *Prog. Biophys. Mol. Biol.* 87 (2-3), 255 (2005).
10. L. Ghibelli, C. Cerella, S. Cordisco, et al., *Apoptosis* 11 (3), 359 (2006).
11. P. Volpe, *Photochem. Photobiol. Sci.* 2 (6), 637 (2003).
12. G. Cremer-Bartels, K. Krause, and H. J. Kuchle, *Gräfes Arch. Clin. Exp. Ophthalmol.* 220 (5), 248 (1983).
13. F. Thoss and B. Bartsch, *J. Comp. Physiol. A: Neuroethol. Sens. Neural Behav. Physiol.* 189 (10), 777 (2003).
14. F. Thoss and B. Bartsch, *Vision Res.* 47 (8), 1036 (2007).
15. В. Н. Бинги, В. А. Миляев, Р. М. Саримов и А. А. Заруцкий, *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника* 8-9, 49 (2006).

16. V. N. Binhi, *Magnetobiology. Underlying physical problems* (Acad. press, London, 2002).
17. E. Choleris, C. Del Seppia, A. W. Thomas, et al., *Proc. Biol. Sci.* 269 (1487), 193 (2002).
18. В. Н. Бинги, А. А. Заруцкий, С. В. Капранов и др., *Радиационная биология. Радиоэкология* 45 (4), 451 (2005).
19. M. Berk, S. Dodd, and M. Henry, *Bioelectromagnetics* 27 (2), 151 (2006).
20. C. Graham, A. Sastre, M. R. Cook, and M. M. Gerovich, *Clin. Neurophysiol.* 111 (11), 1936 (2000).
21. E. Lyskov, N. Kalezić, M. Markov, et al., *Bioelectromagnetics* 26 (4), 299 (2005).
22. J. Dobson, *Exp. Brain. Res.* 144 (1), 122 (2002).
23. L. Hillert, N. Berglind, B. B. Arnetz, and T. Bellander, *Scand. J. Work Environ. Health* 28 (1), 33 (2002).
24. N. Schreier, A. Huss, and M. Roosli, *Soz. Präventiv-med.* 51 (4), 202 (2006).
25. J. R. Stroop, *J. Exp. Psychol.* 18, 643 (1935).
26. S. W. Kuffler, *J. Neurophysiol.* 16 (1), 37 (1953).
27. R. N. Shepard and L. A. Cooper, *Mental images and their transformation* (MIT Press, Cambridge, 1982).
28. С. Пинкер, *Язык как инстинкт* (УРСС, М., 2004).
29. W. Wiltchko, U. Munro, R. Wiltchko, and J. L. Kirschvink, *J. Exp. Biol.* 205 (Pt 19), 3031 (2002).
30. S. Johnsen and K. J. Lohmann, *Nat. Rev. Neurosci.* 6 (9), 703 (2005).
31. V. N. Binhi and D. S. Chernavskii, *Europhysics Lett.* 70 (6), 850 (2005).
32. P. P. Schulteis-Grassi and J. Dobson, *Biometals* 12 (1), 67 (1999).
33. А. Л. Бучаченко, Р. З. Сагдеев и К. М. Салихов, *Магнитные и спиновые эффекты в химических реакциях* (Наука, Новосибирск, 1978).
34. T. Ritz, S. Adem, and K. Schulten, *Biophysical J.* 78 (2), 707 (2000).
35. W. Wiltchko and R. Wiltchko, *J. Comp. Physiol. A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology* 191 (8), 675 (2005).
36. V. N. Binhi and A. B. Rubin, *Electromagn. Biol. Med.* 26 (1), 45 (2007).
37. V. N. Binhi, *Int. J. Radiat. Biol.* In press, (2008).

Influence of the Compensation of the Geomagnetic Field on Human Cognitive Processes

R.M. Sarimov, V.N. Binhi, and V.A. Milyaev

Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Vavilova 38, Moscow, 119991 Russia

The influence of the compensation of the geomagnetic field to a level less than 0.4 μT on human cognitive processes has been studied. Forty persons took part in the study; they were divided by sex and age into four groups. The cognitive abilities of the persons were tested. Each person took part in two experiments: in control conditions and under the exposure to zero magnetic field. A 45-min exposure to zero magnetic field caused statistically significant changes in five of eight parameters of the cognitive tests. The magnitude of the effects varied between 1.3 and 6.2%, with an average value for all tests being 2.1% ($p < 0.002$, MANOVA). Exposure to zero magnetic field led predominantly to an increase in the number of errors and the time the task was performed as compared with the controls. Men passed the tests in zero magnetic field better than women, and young people did it better than aged persons. Groups of persons were distinguished that responded differently to zero magnetic field, the differences being not related to the age or gender.

Key words: biological effects of magnetic and electrostatic fields, biogenic magnetite, magnetoreception, color perception