

5. Cabannes J. La Diffusion Moleculaire de la Lumiere. Paris, 1929.
6. Edsall J.T., Edelhoeh H., Lontie R., Morrison P.R. // J. Am. Chem. Soc. 1950. 72. P. 4641.
7. Петрова Г.П., Петрусевиц Ю.М., Ширкова И.И., Ревакотов О.П. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1987. № 2. С. 59. (Moscow University Phys. Bull. 1987. No. 2. P. 71).
8. Petrova G.P., Petrusevich Yu. M., Borisov B.A. // SPIE: Laser Application in Life Sciences. 1990. 1403. P. 387.
9. Петрова Г.П., Петрусевиц Ю.М. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1994. № 3. С. 45 (Moscow University Phys. Bull. 1994. No. 3. P. 41).
10. Петрова Г.П., Петрусевиц Ю.М., Евсеевичева А.Н. и др. Препринт физ. ф-та МГУ. 1997, № 4.

УДК 574. 24 + 591. 513

ПОЗИТИВНЫЕ И НЕГАТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ НЕБОЛЬШИХ ИСКАЖЕНИЙ ЕСТЕСТВЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПОЗНАВАТЕЛЬНУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

К. А. Никольская, О. В. Ещенко, В. Н. Шпинькова, В. Н. Костенкова

Изучено влияние неоднородности магнитного поля нМП (в пределах 300 мкТл) на обучение крыс. Негативный эффект проявился в неспособности крыс самостоятельно обучаться, а позитивный — в ускорении переработки информации. При этом сформированное поведение было крайне неустойчивым с признаками психоэмоционального перенапряжения. Предполагается, что нМП приводит к рассогласованию между заданным уровнем когнитивной деятельности и физиолого-биохимическими возможностями реализующего субстрата.

Многочисленные факты свидетельствуют о том, что живые системы обладают высокой чувствительностью к электромагнитным полям (ЭМП) низких интенсивностей не только на молекулярном, клеточном [1–3], но и на психофизиологическом уровне [1, 4–6]. Однако при обилии экспериментальных фактов механизм целостной реакции организма пока остается неясным. Таким образом, наиболее актуальный для современного человека вопрос о характере воздействия ЭМП на психическую деятельность до настоящего времени остается наименее изученным. Имеющиеся немногочисленные данные весьма противоречивы, так как, с одной стороны, выявляются факты ухудшения внимания, памяти, изменения эмоционально-волевой сферы [4], а с другой — описаны случаи весьма благоприятного воздействия ЭМП при лечении ряда заболеваний [7].

К сожалению, в большинстве экспериментальных исследований используются довольно простые поведенческие модели, позволяющие наблюдать лишь элементарные формы психической деятельности. В связи с этим существуют определенные трудности в интерпретации получаемых данных при оценке эффектов на высшие психические функции у человека, которые являются ведущими в его жизнедеятельности. В нашей работе мы попытались на сложной поведенческой модели, разработанной для создания высокого уровня информационной нагрузки у животных, выяснить, как влияют небольшие возмуще-

ния постоянной составляющей естественного геомагнитного фона на основные процессы познавательной деятельности.

Методика

В работе использованы крысы-самцы линии Вистар ($n = 60$) весом 250–300 г. Становление пищедобывательного поведения изучалось в камере (плексиглас, $90 \times 60 \times 40$ см), состоящей из свободного поля и разветвленного лабиринта. Обучение проводили ежедневно по методике свободного выбора. Длительность опыта составляла 13 мин, пищевая депривация — 22 ч. Алгоритм задачи представлял собой 4-звенную последовательность оперантных действий: 1) войти в лабиринт из свободного поля; 2) найти одну подкрепляемую кормушку из четырех имеющихся (две ложные); 3) перейти ко второй подкрепляемой кормушке; 4) выйти из лабиринта в свободное поле через один из двух имеющихся выходов для того, чтобы вновь войдя в лабиринт, иметь возможность еще раз получить подкрепление в тех же кормушках. В процессе обучения регистрировали условнорефлекторные параметры (число заходов в лабиринт, длину маршрута в лабиринте, число подкреплений и ошибок, долю минимизированных решений) и безусловнорефлекторные реакции, сгруппированные по классам (ориентировочные, ориентационные, груминг, пассивные и активные стрессовые и невротические).

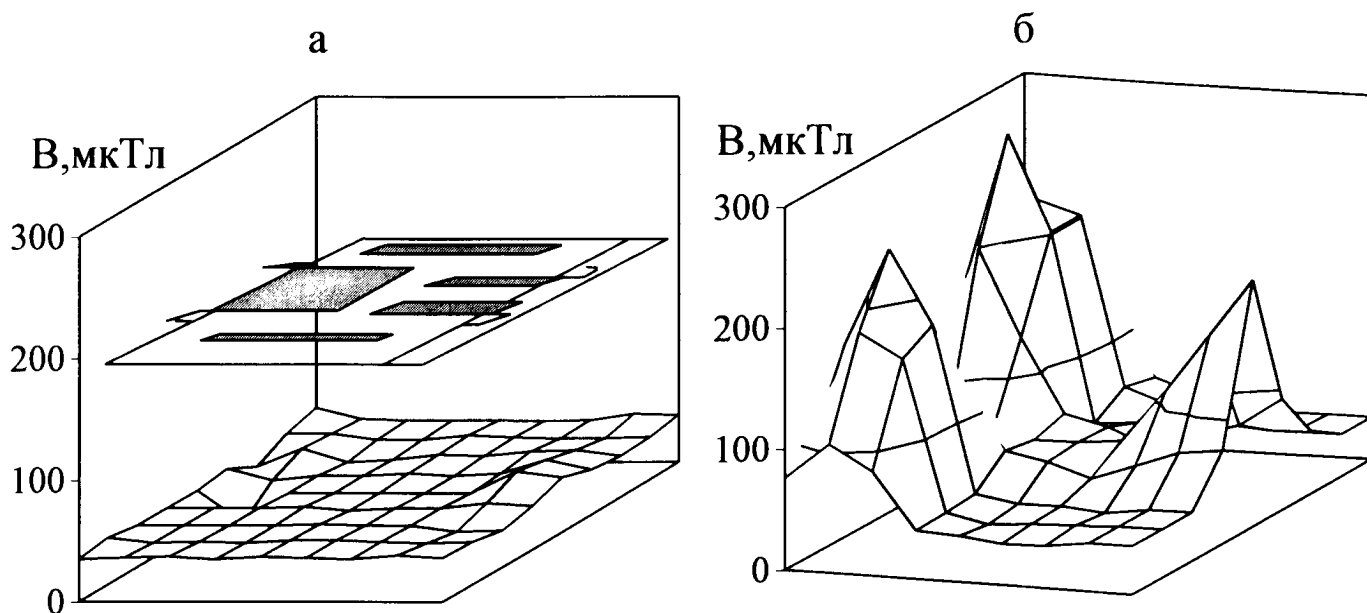


Рис. 1. Распределение суммарного вектора магнитной индукции в экспериментальной среде: естественное однородное МП в контрольной группе (а) и неоднородное МП в опытной группе (б). Горизонтальная проекция лабиринта схематически показана над диаграммой распределения МП

В контрольной группе ($n = 40$) информационная нагрузка предъявлялась на фоне естественного однородного магнитного поля, $B = 37 \pm 2$ мкТл (рис. 1). В опытной серии ($n = 20$) неоднородное МП (нМП) создавалось тремя постоянными магнитами, расположенными под камерой. Значения магнитной индукции колебались от 35 до 300 мкТл в различных точках пола камеры. Измерения проводили с помощью магнетометра ТМ75-41, разработанного в ИЗМИРАН.

Для оценки основных познавательных процессов: *восприятия* (распознавание принципа подкрепления как переход от 1-й кормушки ко 2-й; звено 3); *оценки* (определение из многих вариантов адекватного способа достижения подкрепления; цепь из звеньев 1–2–3) и *прогнозирования* (установление правила поведения, удовлетворяющего условию — максимум подкрепления при минимуме действия; формирование цикла из звеньев 1–2–3–4–1) был использован информационный анализ с применением психолингвистики. Для каждого процесса подсчитывали относительную вероятность $P_{B(A)}$ устойчивого воспроизведения в навыке результата переработки информации; число проб (N_t) и опытов (N_s), потребовавшихся для достижения выбранного критерия $P_{B(A)} > 0,5$. Интенсивность познавательного процесса определялась по формуле $I = 10^2 / (N_t \cdot N_s)$.

После завершения обучения проводили тестирование сформированного навыка на его устойчивость к различным внешним возмущениям: 1) на внезапный раздражитель (свет или звук), включенный на 1 секунду в момент осуществления навыка; 2) на изменение параметров МП путем внесения (у контроль-

ной группы) или удаления (у опытной группы) трех постоянных магнитов; 3) на поворот камеры по часовой стрелке на 90° перед началом опыта; 4) на изменение условий содержания в промежутках между опытами (социальная изоляция). Реакцию животных оценивали по характеру локомоторной активности, числу ошибок и безусловнорефлекторным реакциям.

Регистрацию данных и первичный анализ поведения животного осуществляли с помощью авторской программы Labyrinth. Проводили регрессионный, корреляционный и кластерный анализ различных показателей поведения животных. Полученные результаты оценивали с помощью t -критерия Стьюдента.

Результаты исследования

Популяция крыс Вистар по характеру обучения была неоднородна: только 40% крыс смогли решить предложенную задачу, в среднем им потребовалось около $78,7 \pm 8,9$ проб в течение $7,8 \pm 1,6$ опытов. 60% крыс отказались от решения пищедобывательной задачи и были способны сформировать лишь элементарный пищевой условный рефлекс (побежку к кормушке). Как показал анализ, один из наиболее ярких эффектов нМП состоял в полном подавлении у всех животных, независимо от индивидуальных особенностей, способности самопроизвольного формирования навыка. После четко выраженной ориентировочной активности в незнакомой среде в течение первых трех минут опыта у крыс вместо перехода к исследовательской активности, как это наблюдалось в контрольной группе, развивалась длительная и глубокая двигательная депрессия. Несмотря на высокий

уровень голода (пищевая депривация 22 ч) и наличие корма в среде, у животных на фоне нМП не формировалось мотивационное состояние, направленное на удовлетворение потребности.

Отсутствие каких-либо признаков обучения на протяжении 5 опытов побудило нас применить стандартную процедуру (принудительное заталкивание животного в лабиринт), обычно используемую для крыс, не способных к самоорганизации. Оказалось, что такая достаточно грубая процедура, усиливающая в контрольной группе уровень страха и двигательную заторможенность, в опытной группе оказала сильное активирующее воздействие. В результате 50% крыс, как и в контрольной группе, смогли организовать пищедобывательное поведение. Однако в отличие от контрольных животных на весь процесс обучения им потребовалось меньше проб ($47,7 \pm 5,2$; $p < 0,05$) и меньше число опытов ($4,5 \pm 1,4$; $p < 0,05$). Таким образом, нМП хотя и не нарушало исходное распределение популяции по признаку способности к обучению, но вносило ряд особенностей в характер протекания процессов переработки информации.

Информационный анализ выявил, что в контрольной группе процесс восприятия, а именно распознавание основных семантических элементов задачи, проходил относительно легко; потребовалось не более $12,6 \pm 5,9$ проб в пределах $2,9 \pm 0,7$ опытов. Гораздо большую трудность представлял этап оценки значимой информации, результаты которого проявлялись в поведении только к 5-му опыту. Для устойчивого воспроизведения в поведении результатов оценки животным требовалось в среднем $29,7 \pm 7,6$ проб. Процесс прогнозирования целостного решения (обобщение) был наиболее длительным ($7,8 \pm 2,1$ опытов и $36,4 \pm 8,2$ проб), но у большинства животных отличался стабильностью воспроизведения после его завершения. Оказалось, что на фоне нМП все познавательные процессы были не только ускорены, но и облегчены: на процесс восприятия потребовалось $10,7 \pm 2,1$ проб в течение $1,8 \pm 0,5$ опытов, на оценку значимой информации — $18,1 \pm 4,3$ проб и $3,5 \pm 1,2$ опытов и на формирование адекватного поведенческого ответа (прогнозирование) — $19,2 \pm 6,1$ проб и $6,3 \pm 1,8$ опытов. Таким образом, интенсивность познавательного процесса в условиях нМП была вдвое выше по сравнению с контрольной группой, причем интенсивность каждого из процессов (восприятия, оценки и прогнозирования) была повышена в равной степени (рис. 2).

Однако хотя процесс переработки информации крысами в условиях нМП был ускорен, он в отличие от контрольной группы не завершался оптимизацией двигательного навыка. Если у контрольных животных на стадии стабилизации навыка доля минимизированных решений за опыт достигала $P_{\min} = 0,88$, то у опытных животных этот показатель варьировал от 0,38 до 0,56. При этом обнаружена интересная

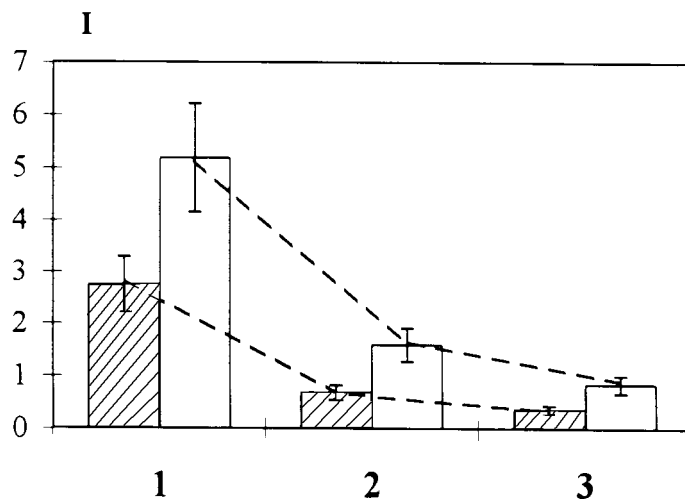
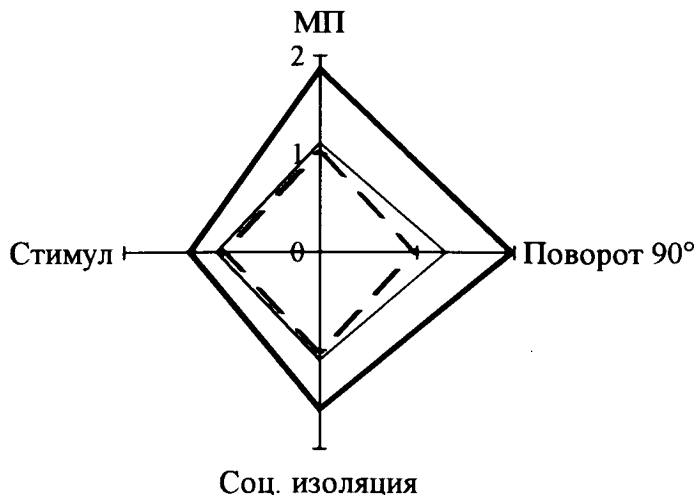


Рис. 2. Интенсивность процессов переработки информации в зависимости от условий обучения. Штрихованные столбцы — обучение на фоне естественного МП (контрольная группа), белые — обучение на фоне неоднородного МП (опытная группа); 1 — восприятие, 2 — оценка, 3 — прогнозирование. По оси ординат отложены значения интенсивности, вычисленные по формуле, приведенной в разделе «Методика»

закономерность: чем выше была скорость обучения, тем меньше оказывалась вероятность оптимизации поведения. Этот феномен коррелировал с крайней неустойчивостью воспроизведения навыка у крыс, обучавшихся в условиях нМП: число выполнений (заходов в лабиринт) варьировало в широких пределах от опыта к опыту: $\Delta N_t = 15,6 \pm 7,2$ по сравнению с $\Delta N_t = 4,6 \pm 2,1$ в контрольной группе. Кроме того, реализация навыка у большинства опытных животных сопровождалась повышенным уровнем активных стрессовых реакций, что свидетельствовало о психоэмоциональном перенапряжении и было характерно только для 10% крыс в контрольной группе.

Результаты стандартных тестов на устойчивость выработанного навыка по отношению к различным внешним воздействиям также были достаточно неожиданными. Оказалось, что чувствительность крыс, обучавшихся на фоне нМП, к любым возмущениям во внешней среде была значительно выше, чем у контрольных животных (рис. 3), и обнаруживалась как на условнорефлекторном, так и на инстинктивном уровне реагирования. Внезапный звук или свет, включенный во время осуществления навыка, у опытных животных вызывал, в отличие от контрольных, не только усиление ориентировочных реакций (в среднем в 1,4 раза; $p < 0,05$), но и возрастание ошибок при реализации навыка (в 1,43 раза; $p < 0,05$), в то время как у контрольных крыс различия этих параметров были статистически не значимы. Более того, изменение условий, прямо не связанных с выполнением задачи (смена камеры содержания, корма, социального статуса в группе и т.д.) сразу же отражалось на характере поведения крыс в лабиринте. Как правило, это



Соц. изоляция

Рис. 3. Характеристика чувствительности животных к внешним воздействиям в зависимости от условий обучения. Штриховая линия — интегральный показатель условно- и безусловнорефлекторных параметров в опыте до воздействия, принятый за 1; тонкая сплошная линия — реакция крыс в контрольной группе, жирная линия — реакция крыс, обучавшихся на фоне неоднородного МП

проявлялось в уменьшении числа минимизированных решений ($P_{\min} = 0,35$) и в возрастании числа ошибочных действий (в 2,96 раза; $p < 0,01$). В контрольной группе реакция животных на новую ситуацию была выражена гораздо слабее. Восстановление исходного уровня реализации навыка у опытных крыс происходило значительно дольше, чем у контрольных, и занимало 2–3 опыта.

Особого внимания, на наш взгляд, заслуживают факты повышения чувствительности крыс, обучавшихся на фоне нМП, к изменениям параметров естественного МП. Изменение исходной конфигурации МП (перемещение магнитов) у этих крыс сразу же вызывало четко выраженную дезориентировку в виде удлинения маршрута в лабиринте (в 2,32 раза; $p < 0,01$), значимого увеличения остановок и колебаний в развилках лабиринта (в 1,7 раз; $p < 0,05$), а также возрастания у части крыс ошибок при воспроизведении решения задачи. Поворот камеры на 90° у опытных крыс вызвал не только общую ориентировочную реакцию, так же как у контрольных животных, но и специфические проявления в виде дезориентировки в пространстве, не наблюдавшиеся у контрольных животных. Эти данные указывают на то, что для крыс, обучавшихся на фоне нМП, характеристики магнитного фактора имели информационное значение при организации целенаправленного поведения.

Обсуждение

В последнее время в связи с возрастающим значением экологических исследований, направленных на оценку безопасности современных условий окружающей среды для жизнедеятельности и здоровья че-

ловека, все большее внимание привлекают воздействия низких интенсивностей, в том числе эффекты слабых магнитных полей. Среди вопросов, посвященных «магнитному загрязнению» среды, особое значение придается проблеме искажений естественного геомагнитного фона, связанных с применением бытовых электроприборов [8, 9]. Настоящее исследование, а также полученные нами ранее результаты [10–12] свидетельствуют, что небольшие искажения естественного магнитного фона могут вызывать широкий спектр эффектов, как позитивных, так и негативных, отражающихся на процессах высшей нервной деятельности. Обращает на себя внимание тот факт, что указанные эффекты проявлялись только при наличии психической нагрузки, в то время как при содержании животных в условиях вивария на фоне сравнимых искажений естественного МП эти изменения отсутствовали. Таким образом, полученные факты указывают на то, что психическая деятельность обладает специфической чувствительностью к параметрам МП, которые, возможно, через физиолого-биохимический субстрат ЦНС определяют тип функционирования ВНД. Следует отметить, что факты влияния МП различных интенсивностей на процессы ЦНС хорошо известны [1, 4, 5], однако механизмы целостной реакции организма в виде поведенческого ответа пока далеко не ясны.

Один из основных негативных эффектов неоднородного МП, обнаруженный в настоящем исследовании — подавление самоорганизации у животных — свидетельствует о том, что МП-фактор непосредственно участвует в формировании мотивационного состояния. На первый взгляд, этот эффект мог быть обусловлен понижением уровня активации ЦНС на фоне нМП, однако возможность обучения животных после незначительной внешней стимуляции опровергает такое объяснение. Более того, возможность сверхбыстрой переработки информации на фоне нМП дает основание предполагать, что МП участвует в определении условий для ассоциативной деятельности ЦНС. Наблюдаемое облегчение процессов переработки информации могло приводить к расширению объема оперативной памяти, что в свою очередь обуславливало более быстрое обучение.

Однако возможность ускорения процессов переработки информации поднимает, на наш взгляд, важные вопросы: почему в норме процессы переработки информации идут медленнее и насколько биологически оправдано их облегчение при некоторых воздействиях извне. Такие негативные последствия обучения на фоне нМП, как отсутствие оптимизации сформированного навыка, высокая неустойчивость поведения в стандартных условиях эксперимента, повышенная чувствительность к различным внешним воздействиям, психоэмоциональное перенапряжение, на наш взгляд, являются свидетельствами рассогласования между заданным искаженным МП

уровнем функционирования процессора (психики) и возможностями структуры, реализующей его результат (ЦНС). Обращает на себя внимание то, что полученные как позитивные, так и негативные эффекты коррелировали с высокой чувствительностью животных к параметрам МП. При этом поведенческая неустойчивость постоянно сопровождалась высоким уровнем стрессовых реакций, что, по нашему мнению, указывало на наличие психоэмоционального перенапряжения.

Описанные эффекты, а также полученные нами ранее факты участия нМП в развитии предтромбозного состояния [13] и алкогольного влечения [14] позволяют высказать предположение, что искусственно повышенная чувствительность к МП, несмотря на ее позитивные информационные эффекты, в целом биологически неоправданна, поскольку может делать живую систему более зависимой не от внутренних, а от внешних факторов, в том числе и от электромагнитных характеристик окружающей среды.

Литература

1. *Нахильницкая З.Н., Смирнова Н.П.* // Экологическая физиология человека. М., 1979. С. 495.
2. *Казначеев В.П., Михайлова Л.П.* Биоинформационная функция естественных электромагнитных полей. Новосибирск, 1985.
3. *Пресман А.С.* Электромагнитные поля и живая природа. М., 1968.
4. *Холодов Ю.А., Шишло М.А.* Электромагнитные поля в нейрофизиологии. М., 1979.
5. *Судаков К.В.* // Журн. высш. нервн. деят. 1976. **26**, № 5. С. 899.
6. Биогенный магнетит и магниторецепция / Под ред. Дж. Киршвинка, Д. Джонса, Б. Мак-Фаддена. М., 1989. Т. 2.
7. *Sandyk R.* // Int. J. Neurosci. 1992. **66**, No. 2. P. 237.
8. *Ossenkopp K.-P., Kavaliers M.* // J. Bioelectricity. 1988-89. **7**, No. 2. P. 189.
9. *Григорьев Ю.Г.* // Радиационная биология. Радиоэкология. 1996. **36**, № 5. С. 659.
10. *Никольская К.А., Штемлер В.М., Савоненко А.В., Осипов А.И.* // Биофизика. 1996. **41**, № 4. С. 887.
11. *Nikolskaya K., Shtemler V., Yeshchenko O.* et al. // Electro-Magnetobiology. 1996. **15**, No. 3. P. 163.
12. *Никольская К.А., Еценко О.В., Шпилькова В.Н.* // Журн. высш. нервн. деят. 1997. **47**, № 4. С. 684.
13. *Savonenko A., Nikolskaya K., Andreenko G.* et al. // J. Thrombosis and Haemostasis. 1993. **69**, No. 6. P. 1025.
14. *Nikolskaya K., Yeshchenko O., Shpinkova V.* et al. // Chronobiology and Its Roots in the Cosmos / Ed. M. Mikulecky. High Tatras, 1997. P. 193–200.