

538,22

МАГНИТЫ В ЖИВЫХ ОРГАНИЗМАХ

С давних пор влияние магнитных полей на живые системы привлекало большое внимание. Однако исследования носили главным образом физиологический характер, а физические основы действия поля оставались неясными. В последнее время появились работы, посвященные поиску и измерению магнитных компонентов в тканях таких живых объектов, как почтовые голуби (1), рабочие пчелы (2), определенные виды бактерий (3).

Существуют по крайней мере три теоретические модели, объясняющие, как животные детектируют магнитные поля.

Первая модель предполагает, что в тканях содержится электрический контур, в котором при быстром движении в геомагнитном поле индуцируется вполне измеримый ток. Отсутствие поведенческих реакций голубей на магнитные стимулы в условиях лаборатории ⁴ свидетельствует в пользу этой гипотезы. Однако она сталкивается с трудностями при объяснении следующего известного опыта. Постоянные магниты, прикрепленные к шее или голове голубей, нарушают их способность ориентироваться в пространстве. Трудно представить себе, почему бы это могло быть, если детектор устроен по принципу индукции электрического тока в проводящем контуре. Кроме того, недавнее наблюдение ⁵, что медленно движущиеся саламандры ориентируются в магнитных полях, делает гипотезу об индукционной ориентации тем более сомнительной.

Вторая модель основана на гипотезе, что детекторы магнитного поля имеют парамагнитную природу. Во внешнем магнитном поле детекторные молекулы генерируют собственное магнитное поле, которое каким-то образом измещается нервной системой. Гипотеза эта привлекательна с той точки зрения, что многие органические молекулы обладают парамагнитными свойствами. Кроме того, теоретически возможно построение парамагнитноподобных детекторов, которые представляют собой частички ферромагнетика, например одиночные домены, дисперсно распределенные в малом объеме какои-либо ткани. Такого рода детекторы называют суперпарамагнитными.

Третья модель магнитного детектора — постоянные магниты, которые могут вращаться при изменении направления магнитного поля, создавая при этом момент сил.

Последняя возможность, по всей видимости, реализуется в железосодержащих бактериях. В магнитном поле они ведут себя как однодоменные ферромагнетики ⁶. При культивировании таких клеток в среде, содержащей достаточное количество железа (~ 29 мкМ), в них методом электронной микроскопии обнаруживаются цепочки из кристаллов с общей длиной более 1000 нм и размерами одного кристалла порядка 50 нм. Исследование мессбауэровских спектров замороженных и высушенных бактерий показало, что железосодержащий материал магнитных клеток является магнетитом (Fe_3O_4). Каждая бактерия имеет магнитный момент $M = 1,3 \cdot 10^{-12}$ электромагнитных единиц (10^{-3} эл.-магн. ед. = $1 \text{ A} \cdot \text{м}^2$), достаточный для ориентации в геомагнитном поле $H = 0,5$ Гс ($MH = 6,6 \cdot 10^{-13}$ эрг, а $kT = 4,1 \cdot 10^{-14}$ эрг при $T = 300$ К).

Поиск магнитных тканей у почтовых голубей и пчел, проведенный в работах ^{1,2}, показал, что в этих случаях могут, в принципе, работать два механизма детектирования: постоянные магниты и суперпарамагнитные области. Ниже будут приведены данные о магнитных тканях в голубях, в основном по работе ¹. Исследования магнитного детектора пчел выполнены практически теми же методами.

Для определения постоянных магнитов и суперпарамагнитных доменов готовили кашлицу из мелких кусочков тканей голов и шей, которую помещали затем в магнетометр. Измеряли остаточную намагниченность, индуцированную при комнатной температуре магнитом 700—2000 Гс, а также намагниченность, возникающую при охлаждении до -196°C (тест на суперпарамагнитные области размером 200—400 Å). При обнаружении намагниченности искали именно те кусочки ткани в пробе, которые, собственно, и обладали магнитной активностью.

В каждом голубе нашли естественный магнитный материал. Он всегда был однослонным и располагался очень близко к черепу в малой (1—2 мм) области ткани. Только около 40% голубей имели естественную намагниченность — 10^{-7} — 10^{-6} электромагнитных единиц, но все голуби имели индуцированную намагниченность. Величина ее составляла 10^{-6} — 10^{-5} электромагнитных единиц (мера общего количества магнитного материала; это эквивалентно полю, которое могли бы продуцировать приблизительно 10^7 одиночных доменов магнетита размером порядка 0,1 мкм).

В магнитных тканях, замороженных в жидком азоте, индуцировали намагниченность с помощью магнита в 3000 Гс, а затем следили за уменьшением намагниченности при нагревании до комнатной температуры. Отсутствие резких скачков в снижении намагниченности свидетельствует о том, что ткань содержит мало суперпарамагнитных доменов.

Исследование магнитной ткани под электронным микроскопом показало, что она содержит нервные волокна и соединительную ткань, в ней присутствует большое число кластеров электронно-плотных структур длиной 0,08—0,15 мкм и отношением

длины к ширине 4 : 1, т. е. с размерами, характерными для одиночных доменов, состоящих из магнетита или магемита, или для суперпарамагнитных доменов, образованных какими-то другими естественно встречающимися магнитными веществами, например гематитом. В случае магнетита размер кристаллов и величина индуцированной намагниченности свидетельствуют о присутствии 10^7 — 10^8 однодоменных магнитов.

Анализ методом электронного зонда показал, что электронно-плотные частицы богаты железом — главным компонентом всех магнитных материалов. В них есть также небольшие количества никеля, меди, цинка, свинца. Те же элементы в следовых количествах обнаружены в кристаллах магнетита, синтезируемого обитателями моря — панцирными моллюсками (хитонами) ⁷.

Рентгеновский анализ подтвердил присутствие железа. По составу и количественному соотношению элементов магнитный материал голубей должен представлять собой магнетит или магемит, или композицию этих двух минералов. В пользу магнетита как основного компонента магнитной ткани голубей говорят и результаты измерения температуры Кюри (для одного определения объединяли магнитные ткани пяти голубей) — $570^\circ \pm 10^\circ\text{C}$. Известно, что остаточная намагниченность магемита исчезает между 300 и 400°C , а магнетита — при 580°C .

Дополнительные данные были получены с помощью световой микроскопии. Под световым микроскопом кристаллы магемита — оранжевые, а магнетита — черные. Это связано с тем, что октаэдрическая обменная связь в магнетите поглощает фотоны почти на всех частотах. Хотя кристаллы в тканях голубя слишком малы, чтобы можно было говорить об их индивидуальной окраске, но в агрегатах они черные.

Таким образом, основываясь на изложенных выше данных, можно сделать заключение, что первичный магнитный компонент у голубей — магнетит. Аналогичный вывод был сделан и для пчел ².

Эти результаты не доказывают, однако, что голуби и пчелы на самом деле способны детектировать магнитное поле посредством иннервированной богатой магнетитом естественной магнитной структуры, расположенной у голубей в непосредственной близости к череду, а у пчел в верхней трети брюшка. Только физиологические и поведенческие опыты могут помочь определить, используют ли эти живые организмы предполагаемый детектор в своих системах «компасы» и «карты», и если используют, то как.

Е. И. Волков

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Walcott C., Gould J. L., Kirschvink J. L.— Science, 1979, v. 205, p. 1027.
2. Gould J. L., Kirschvink J. L., Deffeyes K. S.— Science, 1979, v. 201, p. 1026.
3. Frankel R. B., Blakemore R. P., Wolfe R. S.— Science, 1979, v. 203, p. 1355.
4. Kreithen M. L., Keeton W. T.— J. Comp. Physiol., 1974, v. 91, p. 355.
5. Phillips J.— Ibid., 1977, v. 121, p. 273.
6. Kalmijn A. J., Blakemore R. P.— Animal Migration, Navigation and Homing.— Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1978.—P. 344.
7. Lowenstam H. A.— Geol. Soc. Am. Bull., 1962, v. 73, p. 435.