

МАТЕРИАЛЫ
ЛЕКЦИЙ ШКОЛЫ

СИСТЕМЫ МАГНИТОРЕЦЕПЦИИ У ПТИЦ

© 2020 г. Н. С. Чернецов^{1,2,*}

¹ Зоологический институт РАН, Санкт-Петербург, Россия

² ФГБУН Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: nikita.chernetsov@gmail.com

DOI: 10.31857/S0044452920071614

Экспериментальное подтверждение способности птиц ориентироваться по сторонам света с помощью геомагнитного поля (использовать магнитный компас) было получено благодаря исследованиям супругов Вольфганга и Розиты Вильчко. Эти авторы в поведенческих экспериментах убедительно показали, что зарянки и другие мигрирующие птицы могут использовать геомагнитное поле как глобальный источник компасной информации (Wiltschko, Wiltschko, 1972). Сенсорный механизм магнитоцепции оставался невыясненным.

Были выдвинуты две основные гипотезы относительно биофизического механизма магнитоцепции у птиц. Согласно одной из них, геомагнитная компасная ориентация опирается на восприятие магнитного поля с помощью светозависимых бирадикальных химических реакций, рецепторной магниточувствительной молекулой является белок криптохром, а магнитоцепция осуществляется в сетчатке глаза. В результате магнитное поле воспринимается в виде зрительного образа, т.е. птицы буквально “видят” магнитное поле (Mouritsen, 2018). Гипотеза, согласно которой химические реакции могут лежать в основе магниточувствительных рецепторов, была выдвинута Клаусом Шультемом и его соавторами (Schulten et al., 1978; Schulten, 1982). Долгое время эта гипотеза не привлекала внимания биологов, т.к. она не предлагала физиологически правдоподобных механизмов трансдукции магнитного сигнала. В 2000 г. идеи К. Шультема были положены в основу т.н. модели радикальных пар (Ritz et al., 2000). Авторы предположили, что птицы могут использовать в качестве магнито-рецепторов светочувствительные молекулы криптохрома, которые расположены в клетках сетчатки и подвергаются фотоокислению в результате абсорбции фотонов. Зависимость функциональности магнитного компаса от спектрального состава света была показана ранее в ряде поведенческих экспериментов. Модель радикальных пар объясняет эти результаты так: только фотоны с определенной длиной световой волны (т.е. соответствующие определенной длине световой волны) могут индуцировать перенос электрона от молекулы криптохрома к рецептору (вероятнее всего, к кофактору криптохрома —

флавинадениндинуклеотиду, ФАД). В результате образуется пара молекул с неспаренными электронами (радикалы), состоящая из донора-криптохрома и его партнера-акцептора. Радикальная пара некоторое время находится в промежуточном состоянии, в котором неспаренные электроны взаимодействуют за счет магнитного сверхтонкого взаимодействия (“сцепленные электроны”). В зависимости от спинового состояния неспаренных электронов, радикальная пара находится либо в синглетном (единственно возможное положение спинов электронов с полным спином, равным 0), либо в триплетном состоянии (три возможных положения спинов электронов с полным спином, равным 1). Радикальная пара некоторое время находится в промежуточном состоянии, в котором взаимодействие спинов неспаренных электронов между собой сильно ослаблено из-за значительного удаления этих электронов друг от друга. Спиновая динамика пары электронов в промежуточном состоянии определяется их сверхтонким взаимодействием с магнитными моментами ядер ближайших атомов. Под влиянием сверхтонкого взаимодействия радикальная пара переходит из триплетного в синглетное состояние и обратно, причем скорость этого процесса, называемого синглет-триплетной интерконверсией, зависит от напряженности внешнего магнитного поля и его ориентации по отношению к оси радикальной пары. Существовая некоторое время (промежуток времени от нескольких наносекунд до нескольких миллисекунд), радикальная пара либо рекомбинирует, либо распадается на энергетически более устойчивые продукты реакции. Относительные вероятности распада или рекомбинации радикальной пары определяются соотношением времени ее жизни и временем синглет-триплетной интерконверсии. Пропорция разных продуктов бирадикальной реакции меняется в зависимости от величины и направления внешнего магнитного поля. В силу динамического характера этого процесса изменение выхода реакции в магнитном поле тем больше, чем длиннее время жизни промежуточного состояния. Чувствительность к геомагнитному полю требует

весьма долгих времен жизни, не менее 10 микросекунд, что является уязвимым местом этой теории.

Другая гипотеза предполагает наличие в гипотетическом магниторецепторном органе птиц аналога стрелки магнитного компаса из намагниченного материала, например, из магнетита (оксид железа Fe_3O_4). При температуре тела птицы магнитные свойства магнетита зависят от размера частиц: крупные частицы (>100 нм) содержат несколько или много магнитных доменов и в отсутствие внешнего магнитного поля имеют тенденцию к слабой собственной намагниченности; более мелкие частицы магнетита (10–100 нм) могут содержать всего один магнитный домен со стабильным магнитным моментом, ориентированным вдоль оси анизотропии микрокристалла; такой кристаллик может играть роль магнитной стрелки, поворачиваясь вдоль силовых линий магнитного поля. Еще более мелкие частицы (<10 нм) являются суперпарамагнитными – их магнитные моменты, хотя и имеют большую величину, могут быть произвольно ориентированы относительно кристаллических осей, из-за чего такие нанокристаллы не выстраиваются вдоль силовых линий поля. В 2000-х гг. предпринимали попытки найти орган с такими структурами, и делались заявления, согласно которым он был найден в надклювье у голубей и других птиц (Fleissner et al., 2003, 2007; Falkenberg et al.

2010). В дальнейшем более тщательные гистологические исследования показали ошибочность этих утверждений (Treiber et al. 2012).

Тем не менее, есть веские основания полагать, что первая ветвь тройничного нерва (V1) несет магниторецепторную информацию, которая получается какими-то рецепторами в области надклювья. Стимуляция меняющимся магнитным полем у зяблика приводила к резко повышенной экспрессии белков раннего ответа ZENK (маркер активности нейронов) в ядрах тройничного нерва (Heyers et al., 2010). Пересечение V1, а также помещение интактных птиц в нулевое магнитное поле (где нет никаких магнитных стимулов) полностью элиминировало этот эффект. Наши исследования показали, что магнитная информация, поступающая от тройничного нерва, необходима тростниковым камышевкам для того, чтобы они могли пользоваться системой позиционирования на местности по время миграции, т.е. пользоваться геомагнитной картой (Kishkinev et al., 2013, 2015; Pakhomov et al., 2018). Скорее всего, второй магниторецепторный орган птиц, связанный с системой тройничного нерва, существует и обеспечивает работу магнитной карты (в отличие от “магнитного зрения”, которое обеспечивает работу компаса). Однако сам рецептор в настоящее время не найден.