

Физика биологии и медицины

*Правильная ссылка на статью:*

Hore P. — Магнитный сенсор на основе ДНК // Физика биологии и медицины. – 2023. – № 1. – С. 74 - 78. DOI: 10.7256/2730-0560.2023.1.40610 EDN: SWLCAN URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=40610](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=40610)

## Магнитный сенсор на основе ДНК

Hore Peter

ORCID: 0000-0002-8863-570X

PhD, Fellows of the Royal Society, Professor, University of Oxford

., Великобритания, г. Oxford, ул. South Parks Road, .

✉ [peter.hore@chem.ox.ac.uk](mailto:peter.hore@chem.ox.ac.uk)



[Статья из рубрики "Биофизика"](#)

### DOI:

10.7256/2730-0560.2023.1.40610

### EDN:

SWLCAN

### Дата направления статьи в редакцию:

28-04-2023

### Дата публикации:

08-06-2023

**Аннотация:** Нижеприведенная статья, предлагаемая читателю в переводе на русский язык, написана известным английским исследователем, проф. Питером Хором (P. Hore). П. Хор координирует исследования за рубежом в области спин-химических механизмов, лежащих, как полагают, в основе способности некоторых видов животных, в частности некоторых перелетных птиц и морских черепах, ориентироваться в магнитном поле Земли и использовать геомагнитный ландшафт в сезонных миграциях. П. Хор является членом Королевского общества, профессором химии в Оксфордском университете и научным сотрудником Колледжа Корпус-Кристи в Оксфорде. П. Хор является автором многих научных статей и учебников, в первую очередь в области ЯМР, ЭПР, спиновой химии и магнитной ориентации, и навигации животных. Оригинальная статья П. Хора на английском языке – это статья в открытом доступе, опубликованная в соответствии с лицензией Американского химического общества (АХО) «Авторский выбор», которая разрешает копирование и распространение статьи или любых ее адаптаций в некоммерческих целях. Предлагаемый перевод является неофициальной адаптацией статьи, опубликованной АХО. АХО не изучал содержание этой адаптации или контекст ее использования с целью одобрения. Перевод на русский язык выполнен В. Бинги в

соответствии с условиями Лицензии и является максимально дословным.

**Ключевые слова:**

магнитобиология, фотолиаза, репарация ДНК, магнитный компас, криптохром, спиновая химия, сетчатка глаза, магниторецепция, квантовая биология, радикальный парный механизм



Это статья в открытом доступе, опубликованная в соответствии с лицензией ACS AuthorChoice License, которая разрешает копирование и распространение статьи или любых ее адаптаций в некоммерческих целях.

Опубликовано 13 марта 2018 г.

DOI: 10.1021/acscentsci.8b00091

ACS Cent. Sci. 2018, 4, 318–320

**Как цитировать эту статью:**

ACS Cent. Sci. 2018, 4, 3, 318–320

Publication Date: March 13, 2018

<https://doi.org/10.1021/acscentsci.8b00091>

Copyright © 2018 American Chemical Society

**Чувствительность ферментов репарации ДНК к слабым магнитным полям может иметь отношение к механизму, с помощью которого птицы ощущают магнитное поле Земли.**

Северные каменки – мелкие перелетные певчие птицы, вес которых примерно равен весу батареи AA, ежегодно пролетают 30000 км с Аляски через Азию в Кению и обратно [1]. Их способность делать это в решающей степени зависит от наличия внутреннего магнитного компаса, с помощью которого можно ощущать магнитное поле Земли. Похоже, что у всех перелетных птиц есть такой светозависимый компас. Хотя ясно, что первичные магниторецепторы расположены в сетчатке глаза птиц, химическая идентичность сенсоров и биофизический сенсорный механизм остаются загадкой [2]. Недавно Жаклин Бартон и ее коллеги из Калифорнийского технологического института в сотрудничестве с Дунпином Чжуном из Университета штата Огайо интригующе предположили, что за это может быть ответственен фермент репарации ДНК [3].

Рассматриваемым ферментом является фотолиаза, фотоактивный белок, содержащий флавинадениндинуклеотид (FAD) в качестве основного хромофора. Фотолиазы восстанавливают повреждения ДНК, например, путем расщепления димеров цикlobутан-пиримидина (CPD), которые могут образовываться соседними тиминовыми основаниями после поглощения ультрафиолетового света (рис. 1). Механизм репарации включает

фотовозбуждение  $\text{FADH}^+$  синим светом, — это полностью восстановленное состояние кофактора, — за которым следует перенос электрона от флавина к поврежденной ДНК с образованием пары радикалов, с одним неспаренным электроном на CPD и другим на флавине ( $\text{FADH}^*$ ). Затем циклобутановые связи, связывающие два тимина, последовательно рвутся, и электрон возвращается к флавину. Весь процесс завершается в течение наносекунды [4].

Рис. 1. Механизм фототиазной репарации ДНК, опосредованной FAD. Гиперссылка на Рис. 1:

<https://www.nature.com/articles/ncomms8302/figures/1>

Перепечатано с разрешения,

с м. [11]. Авторские права

принадлежат Macmillan

Publishers Limited, 2015 г.

Новое исследование Zwang et al. [3] использует тонкий электрохимический метод для мониторинга репарации повреждений CPD в монослоях дуплексов ДНК из 29 пар оснований, связанных с фототиазой *Escherichia coli*. **Примечательно, что скорость репарации, или восстановления, зависит от интенсивности и направления внешнего магнитного поля, создаваемого соседним магнитом из сплава Nd-Fe-B. Даже более слабые магнитные поля, чем земные (около 40 мкТл в лаборатории Бартон), оказывают заметное влияние на эффективность восстановления.**

Отдельные молекулы настолько слабо магнитны, что их взаимодействие с магнитным полем в 40 мкТл обычно полностью подавляется их хаотическими тепловыми движениями, энергия которых в миллион раз больше. Однако радикальные пары обладают уникальными свойствами: они могут существовать в долгоживущих когерентных спиновых состояниях и вступать в спин-селективные химические реакции. Эти особенности делают их чувствительными к мельчайшим магнитным взаимодействиям [2]. Действительно, популярная в настоящее время гипотеза механизма компасной магнорецепции основана на индуцированных светом парах радикалов в близкородственном белке, криптохроме [5]. Криптохромы широко встречаются в природе, в том числе в сетчатке птиц [6], имеют набор функций и обычно считаются эволюционными потомками фототиаз. Они также содержат хромофор FAD, но образуют магниточувствительные радикальные пары другим светозависимым путем: переносом электрона от ароматических остатков аминокислот на полностью окисленный FAD [7]. По большей части криптохромы не обладают функцией репарации ДНК.

Исследование Бартон — первое, в котором сообщается о влиянии магнитного поля на репарацию ДНК, опосредованную фототиазой, и результаты, похоже, согласуются с магнетохимическим механизмом радикальных пар. Магнитное поле ингибирует репарацию ДНК, как и следовало ожидать от радикальной пары, созданной в синглетном состоянии, и эффект достигает насыщения при правдоподобной напряженности поля (~3 мТл). Также, как и ожидалось, изменение скорости репарации не зависит от инверсии магнитного поля, но во всем остальном чувствительно к углу между вектором поля и осью выравнивания комплексов белок-ДНК. **Что важно для потенциального компасного сенсора, магнитный эффект Бартон значительно больше, чем все, о чем сообщалось ранее для криптохромов, где эффекты наблюдались только для магнитных полей более 1 мТл [7].**

Тем не менее, есть некоторые загадочные аспекты. Учитывая время жизни и разделение радикалов в фотолиазе, удивительно, что эффект магнитного поля вообще можно наблюдать. Все радикалы исчезают в течение 1 нс, и в частности радикальная пара, наиболее вероятно являющаяся магниточувствительной. Это пара, содержащая радикал FAD и молекулу CPD, в которой разорвана связь C5-C5', но не связь C6-C6'. Согласно сверхбыстрым спектроскопическим измерениям, она живет менее 100 пс [8]. Но чтобы существенно реагировать на магнитное поле 40 мкТл, радикальная пара должна существовать не менее 1 мкс [9].

Более того, два радикала расположены достаточно близко друг к другу: край изоаллоксазинового кольца FAD удален на ~0,8 нм от 5'-стороны CPD и всего на ~0,43 нм от 3'-стороны [8]. На этих расстояниях можно ожидать сильного электронного обменного взаимодействия, которое заперло бы радикальную пару в ее исходном синглетном спиновом состоянии и блокировало бы любой эффект гораздо более слабых взаимодействий, которые вызывают зависимость от магнитного поля. Эта проблема становится еще более серьезной, если, как предполагается [3], пара радикалов ограничена пиримидиновым димером. Например, бирадикал 1,4, образующийся в результате гомолитического разрыва связи C5-C5' (рис. 5 в Zwang et al. [3]), будет иметь даже большее обменное взаимодействие, чем более традиционная пара  $FADH^* + CPD^{*-}$ .

Одним из способов разрешения некоторых из этих неопределенностей может быть использование фемтосекундных методов Д. Чжуна [3] для поиска влияния магнитного поля как на время жизни ~100-пс состояния  $FADH^* + [T-T]^{*-}$ , так и на коэффициент ветвления его прямой ( $\rightarrow FADH^* + T + T^{*-}$ ) и обратной ( $\rightarrow FADH + [T-T]$ ) стадий реакции. Кроме того, если это еще не известно, возможно, стоило бы установить наличие и распределение фотолиаз в сетчатке перелетных певчих птиц.

## Библиография

1. Bairlein, F.; Norris, D. R.; Nagel, R.; Bulte, M.; Voigt, C. C.; Fox, J. W.; Hussell, D. J. T.; Schmaljohann, H. Cross-hemisphere migration of a 25 g songbird. *Biol. Lett.* 2012, 8, 505–507.
2. Hore, P. J.; Mouritsen, H. The radical pair mechanism of magnetoreception. *Annu. Rev. Biophys.* 2016, 45, 299–344.
3. Zwang, T. J.; Tse, E. C. N.; Zhong, D. P.; Barton, J. K. A compass at weak magnetic fields using thymine dimer repair. *ACS Cent. Sci.* 2018, DOI: 10.1021/acscentsci.8b00008.
4. Zhang, M.; Wang, L. J.; Zhong, D. P. Photolyase: dynamics and electron-transfer mechanisms of DNA repair. *Arch. Biochem. Biophys.* 2017, 632, 158–174.
5. Wang, J.; Du, X. L.; Pan, W. S.; Wang, X. J.; Wu, W. J. Photoactivation of the cryptochrome/photolyase superfamily. *J. Photochem. Photobiol.*, C 2015, 22, 84–102.
6. Günter, A.; Einwich, A.; Sjulstok, E.; Feederle, R.; Bolte, P.; Koch, K. W.; Solov'yov, A. V.; Mouritsen, H. Double-cone localization and seasonal expression pattern suggest a role in magnetoreception for European robin cryptochrome 4. *Curr. Biol.* 2018, 28, 211–223.
7. Maeda, K.; Robinson, A. J.; Henbest, K. B.; Hogben, H. J.; Biskup, T.; Ahmad, M.; Schleicher, E.; Weber, S.; Timmel, C. R.; Hore, P. J. Magnetically sensitive light-induced reactions in cryptochrome are consistent with its proposed role as a magnetoreceptor. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 2012, 109, 4774–4779.

8. Zhong, D. P. Electron transfer mechanisms of DNA repair by photolyase. Annu. Rev. Phys. Chem. 2015, 66, 691–715.
9. Maeda, K.; Henbest, K. B.; Cintolesi, F.; Kuprov, I.; Rodgers, C. T.; Liddell, P. A.; Gust, D.; Timmel, C. R.; Hore, P. J. Chemical compass model of avian magnetoreception. Nature 2008, 453, 387–390.
10. Ritz, T.; Adem, S.; Schulten, K. A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds. Biophys. J. 2000, 78, 707–718.
11. Tan, C.; Liu, Z.; Li, J.; Guo, X.; Wang, L.; Sancar, A.; Zhong, D. The molecular origin of high DNA-repair efficiency by photolyase. Nat. Commun. 2015, 6, 7302.

## **Результаты процедуры рецензирования статьи**

*Рецензия скрыта по просьбе автора*