

Упорядоченное расположение волосяных фолликулов (линии Фойта) и рецепция геомагнитного поля

Зеленцов В.И., Пеккер Я.С., Перельмутер В.М., Фалькович В.М., Чуприкова Е.М.

The ordered arrangement of hair follicles (Foit lines) and reception of a geomagnetic field

Zelentsov V.I., Pekker Ya.S., Perelmuter V.M., Falkovich V.M., Chuprikova E.M.

Сибирский государственный медицинский университет, г. Томск

© Зеленцов В.И., Пеккер Я.С., Перельмутер В.М. и др.

Авторами предложена гипотеза рецепции геомагнитного поля, основанная на особых свойствах кожного покрова млекопитающих. Предполагается, что упорядоченное расположение волосяных фолликулов (линии Фойта) может служить псевдосоленоидом, в котором под действием внешних полей наводятся токи, запускающие нейрогуморальный механизм ответных реакций. В соответствии с этой гипотезой, от ориентации животного относительно вектора геомагнитного поля зависит величина генерируемых афферентных нейрогуморальных сигналов. Вследствие этого происходит большая или меньшая активация гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой системы (ГГНС), которая определяет адаптивный статус животного и, соответственно, адекватность реагирования на совокупность внешних факторов.

Ключевые слова: сенсорная система, электромагнитное излучение, линии Фойта, адаптивный статус.

The authors offer the hypothesis of reception of a geomagnetic field based on the special properties of a mammal's skin. It assumes that the ordered arrangement of hair follicles (Foit lines) can serve the pseudo-solenoid, in which under the action of external fields the currents starting the neuro-humoral mechanism of answer-back reactions are induced. According to this hypothesis, the magnitude of the generated afferent neuro-humoral signals depends on animal orientation concerning a vector of a geomagnetic field. There of there will be a larger or smaller degree of activation of hypothalamus-hypophysis-adrenal system (HHAS) which defines the adaptive status of an animal and, accordingly, adequacy of response to the set of external factors corresponds.

Key words: sensor system, electromagnetic radiation, Foit lines, adaptive status.

УДК 612.799.1:611.78:612.014.426

Из существующих в настоящее время гипотез [10, 12, 16, 21], объясняющих механизм магнито-рецепции вообще и рецепции геомагнитного поля в частности, наиболее широко представлены два направления. Первое основано на роли кристаллов магнетита [8, 12, 13], обнаруженных в клетках различных живых организмов, от бактерий до человека [14, 15]. В соответствии с ним, представляется вероятным существование органа магнито-рецепции, содержащего в качестве основного

компонента кристалл магнетита, однако в чистом виде эта гипотеза подтверждается только для бактерий, обладающих магнитотаксисом [7].

Другое направление в объяснении механизма магнито-рецепции связано с магнитной индукцией [9, 10]. Косвенная магнито-рецепция, основанная на законе Фарадея и сводящаяся, практически, к электрорецепции, реализуется у пластинчатожаберных рыб [11, 19]. Реализация этого механизма у наземных животных в современном

представлении с учетом налагаемых ограничений (плохая электропроводность воздуха) представлялась маловероятной, а орган возможной магниторецепции оставался слабопредставляемым [20]. Ограничения, вызванные физическими особенностями воздушной среды обитания, привели авторов расчетов к представлению об органе магниторецепции как о катушке, состоящей из одного или нескольких витков проводника [20]. Для эффективного функционирования подобного органа рецепции необходимо, чтобы соотношение сигнал-шум составляло $\geq 1,5$, и, следовательно, размеры катушки были не меньше нескольких миллиметров. Из всех известных авторам анатомических структур более всего соответствовали представлению о подобном органе полукружные каналы внутреннего уха [20]. При рассмотрении вопроса о возможном органе магниторецепции наземных животных не были известны обнаруженные нами факты строго упорядоченного расположения линий Фойта перпендикулярно продольной оси тела животного.

Мы предлагаем гипотезу рецепции геомагнитного поля, основанную на особых свойствах кожного покрова млекопитающих. Предполагается, что упорядоченное расположение волосяных фолликулов (линии Фойта) может служить псевдосоленоидом, в котором под действием внешних полей наводятся токи, запускающие нейрогуморальный механизм ответных реакций. В соот-

ветствии с этой гипотезой, от ориентации животного относительно вектора геомагнитного поля зависит величина генерируемых афферентных нейрогуморальных сигналов. Вследствие этого, происходит большая или меньшая активация гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой системы (ГГНС), которая определяет адаптивный статус животного и, соответственно, адекватность реагирования на совокупность внешних факторов.

Первоначально линии Фойта были описаны у человека [2], но позже они были обнаружены у других млекопитающих, таких как кролики, морские свинки и мыши [5] (рис. 1). Результаты предыдущих экспериментальных работ, проведенных на мышах, свидетельствовали о физиологической значимости параметров линий Фойта, которые коррелировали с такими показателями адаптивной системы, как объем ядер кортикоцитов клубочковой и пучковой зон надпочечников, абсолютное и относительное количество лимфоцитов крови [6]. Из всего многообразия пород и линий лабораторных мышей мы остановились на раундбредных животных, чтобы исключить возможные эффекты морфологических и физиологических особенностей линейных мышей.

Для проверки гипотезы о том, что структурная организация кожного покрова мыши соответствует существующим представлениям о возможном органе

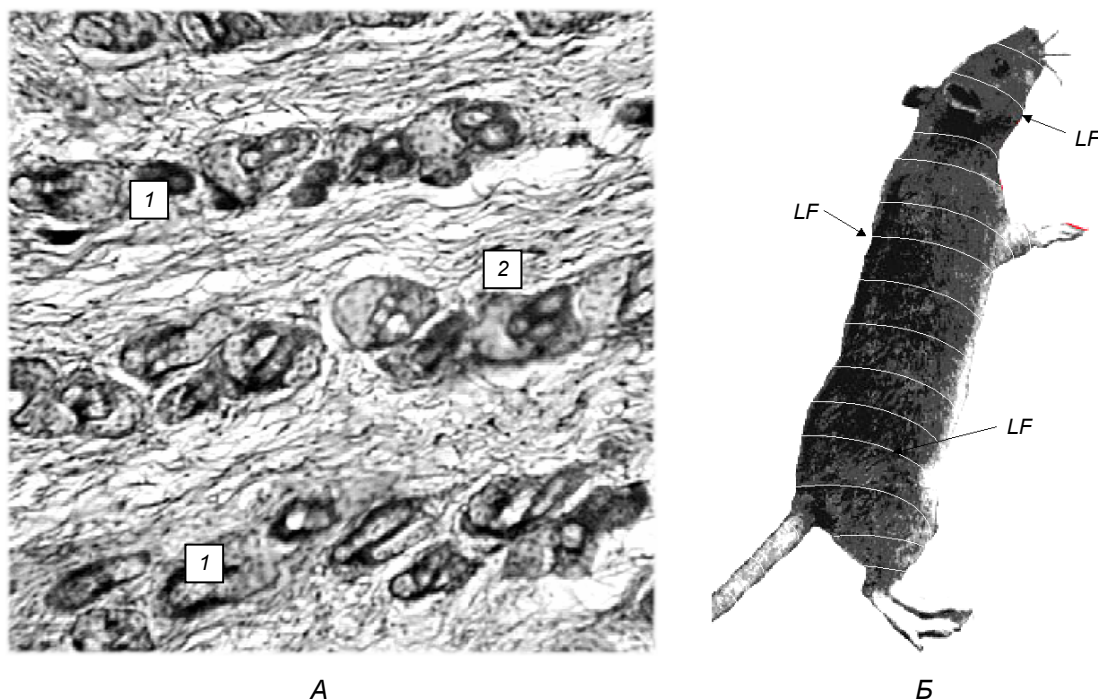


Рис. 1. Линии Фойта. А — гистологический срез кожи мыши выполнен параллельно ее поверхности. 1 — упорядоченно расположенные волосяные фолликулы с сальными железами (собственно линии Фойта). Средняя ширина у мыши составляет около 80 мкм. Придатки кожи имеют богатую сосудистую сеть и иннервацию. 2 — Пространства между линиями Фойта образованы коллагеновыми волокнами и межклеточным веществом с небольшим количеством фибробластов. Средняя ширина — около 100 мкм. В нем многократно меньше сосудов и нервных окончаний. Волосяные фолликулы с сальными железами формируются на границе сетчатого слоя дермы и подкожной клетчатки и проходят через всю толщу кожи (около 1,5 мм). Б — Расположение линий Фойта на теле животного. LF — линии Фойта. Благодаря наличию линий Фойта кожа представляет собой подобие объемной физической сетки, в которой чередуются структуры, построенные разными тканевыми элементами, имеющими разную степень кровоснабжения и иннервации и, вследствие этого, обладающими разной диэлектрической характеристикой

магниторецепции, мы тщательно изучили параметры и ориентацию линий Фойта мышей. Результаты представлены на рис. 1. Полученная картинка идеально соответствует катушке, витки которой образованы чередованием кожных структур с различными электрофизическими свойствами. В качестве «проводников» здесь выступают, с одной стороны, линии Фойта, состоящие из последовательно расположенных групп волосяных фолликулов с сетью опутывающих их капилляров и нервных волокон, и, с другой стороны, соединительная ткань разделяющего линии Фойта пространства. Пространственное расположение этих «проводников» представляет собой некую колебательную систему по аналогии со связанными контурами, имеющую широкую полосу частот и многомодальность вольтамперной характеристики. При этом животное может оказаться чувствительным как к низкочастотным, так и к высокочастот-

ным электромагнитным колебаниям. На эти структуры так же, как и на весь организм мыши, ГМП может действовать, вызывая переориентацию фосфолипидного окружения встроенных в мембрану белков [4], менять скорость химических реакций [3, 21] или непосредственно действовать на ионы Ca^{2+} [17]. Однако структурные особенности кожи позволяют предполагать существование и других возможных механизмов взаимодействия биосистемы и поля. При движении мышь пересекает силовые линии геомагнитного поля. Это может приводить к наведению в «проводниках» токов, величина которых зависит от скорости изменения магнитного потока через проводящий контур и сопротивления «проводников» ($\Phi = HS \sin \varphi$, где Φ — поток магнитной индукции, S — площадь контура, φ — угол между плоскостью контура и направлением силовых линий поля). Таким образом, линейное перемещение мыши, дыхательные

движения животного, а также повороты и подъемы могут наводить индукционные токи (рис. 2, 3).

При движении мыши вдоль горизонтальной составляющей вектора ГМП на дорсальной и вентральной поверхностях наводится электродвижущая сила, индуцирующая возникновение соответствующих токов:

$$\sum U^m = U_{,v}^{dors} + U_{,v}^{ventr}$$

При аналогичном расположении мыши ее дыхательные движения, приводящие к изменению площади сечения грудной клетки, наводят ЭДС на всей поверхности тела. Направление индуцируемых токов при этом зависит от направления изменения площади сечения, т.е. вдох и выдох приводят к возникновению разнонаправленных токов. Вдох — выдох:

$$\sum U^r = \pm (U_{,h}^{dors} + U_{,h}^{ventr} + 2U_{,h}^{side})$$

Суммируя результаты действия движения и дыхания, мы получим (вдох):

$$\sum U = 2 U_{,h}^{side} + (U_{,h}^{ventr} + U_{,v}^{ventr}) + (U_{,h}^{dors} - U_{,v}^{dors});$$

$$\sum U = 2 dS_{,h}^{side} / dt \cdot kH_h + dS_{,h}^{ventr} / dt \cdot kH_h + dI_{,v}^{ventr} / dt \cdot kH_v + dS_{,h}^{dors} / dt \cdot kH_h - dI_{,v}^{dors} / dt \cdot kH_v.$$

Таким образом, **токи**, индуцируемые на **боковых поверхностях**, зависят от дыхательных движений. Токи, индуцируемые на **дорсальной**

поверхности, максимальны при выдохе и минимальны при вдохе. Токи, индуцируемые на **вентральной поверхности**, максимальны при вдохе и минимальны при выдохе.

При расположении животного с востока на запад или с запада на восток, дыхательные движения не приводят к индукции токов.

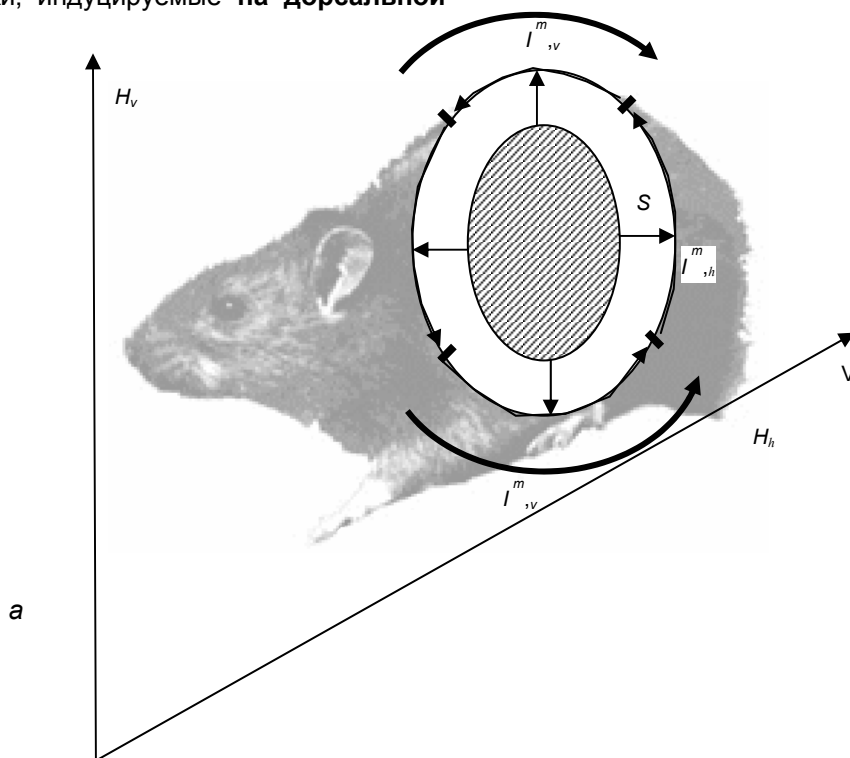
При движении мыши перпендикулярно горизонтальной составляющей вектора ГМП на дорсальной, вентральной и боковых поверхностях наводится электродвижущая сила, индуцирующая возникновение соответствующих токов:

$$U_{,h}^{side} = dI/dt \cdot kH_h;$$

$$U_{,v}^{dors} = U_{,v}^{ventr} = dI/dt \cdot kH_v.$$

Величины напряженностей, наводимых в контуре электрических полей, определяются порядками от 10^{-7} В/м при дыхании мыши до 10^{-5} В/м при ее движении вдоль вектора магнитного поля. Это соизмеримо или превосходит на два порядка величины изменений напряженности электрического поля, фиксируемые электрорецепторами акулы [18]. Нам представляется интересным тот факт, что у всех исследуемых нами мышей наблюдается асимметрия линий Фойта справа и слева. Это наводит на мысль о наличии дифференциальной структуры рецепции электромагнитных полей.

В пользу предложенной гипотезы свидетельствуют и результаты экспериментов по ориентации мышей



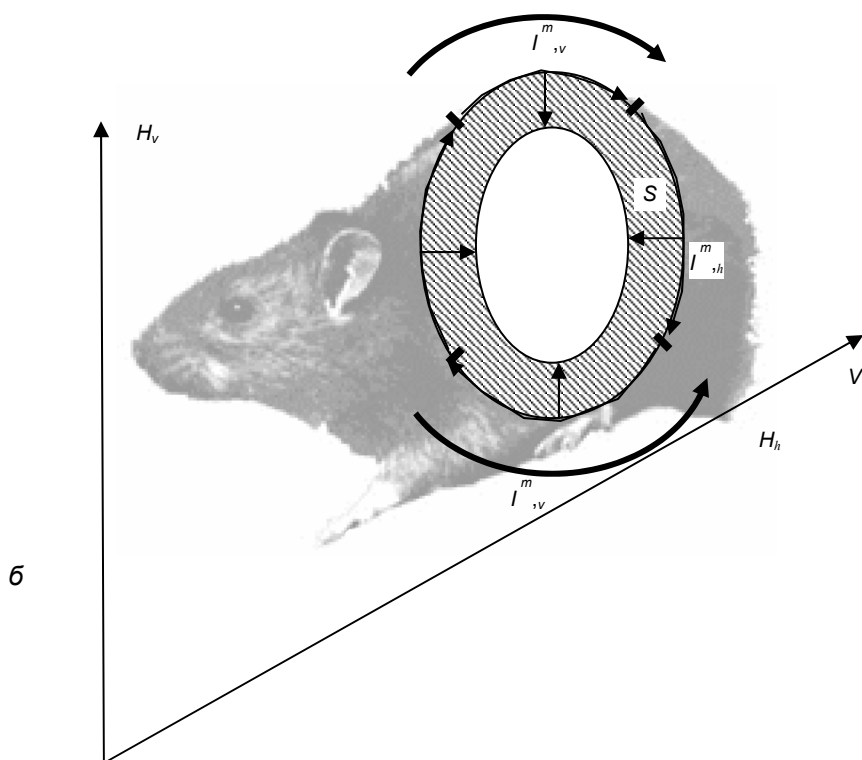


Рис. 2. Токи, наводимые в линиях Фойта при расположении или движении мыши вдоль вектора геомагнитного поля (горизонтальной составляющей): а — вдох; б — выдох; H_h — горизонтальная составляющая геомагнитного поля; H_v — вертикальная составляющая геомагнитного поля; V — скорость движения мыши; $I_{,h}^m$ — токи, индуцируемые при пересечении горизонтальной составляющей ГМП при дыхании животного; $I_{,v}^m$ — токи, индуцируемые при пересечении вертикальной составляющей ГМП при движении животного; S — изменение площади сечения грудной клетки мыши при выдохе

8*

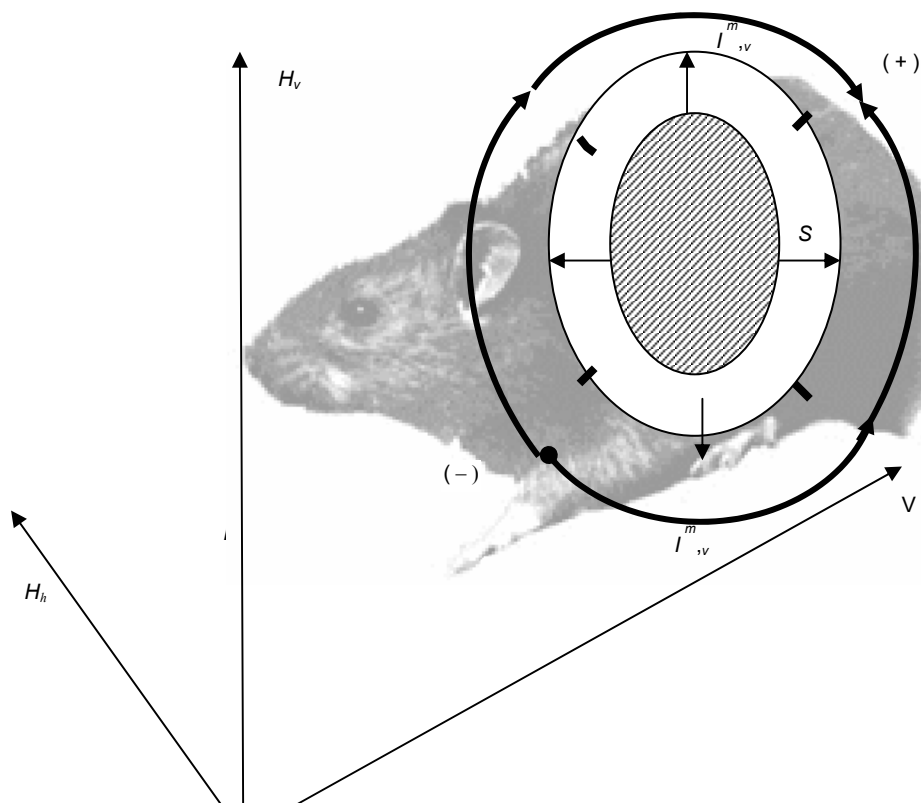


Рис. 3. Токи, наводимые в линиях Фойта при ориентации и движении животного перпендикулярно горизонтальной составляющей ГМП

в крестообразном лабиринте, ветви которого определенным образом расположены относительно вектора геомагнитного поля [1]. В них убедительно было показано, что мыши не просто чувствуют магнитное поле Земли, но выбирают (в зависимости от своего иерархического статуса в группе) определенную ориентацию ветвей лабиринта, а значит, и своего тела.

Проверка предложенной гипотезы на основе более углубленных исследований как физических свойств линий Фойта, так и предполагаемого рецепторного поля, позволит объяснить многие явления, наблюдаемые в природе, и, возможно, целенаправленно использовать воздействие электромагнитного поля на живые организмы для диагностики и прогнозов состояния физиологических систем.

Литература

1. Зеленцов В.И., Пеккер Я.С., Перельмутер В.М., Фалькович В.М., Чуприкова Е.М. Метод регистрации биологических эффектов слабых электромагнитных полей // Патент < 98102648/14(002080), приоритет от 02.02.1998.
2. Калантаевская К.А. Морфология и физиология человека. Москва—Киев, 1972. 267 с.
3. Леднев В.В. Биоэффекты слабых комбинированных постоянных и переменных полей // Биофизика. 1996. Т. 41. < 1. С. 224—232.
4. Симонов А.Н., Вишенская Т.В., Лившиц В.А., Кузнецов А.Н. Влияние постоянного магнитного поля на электрическую емкость бислоистой липидной мембраны // Биофизика. 1984. Т. 29. < 4. С. 610—614.
5. Шаловой В.В., Перельмутер В.М., Ржевская З.И. Сравнительные характеристики расположения волосяных фолликулов (линий Фойта) в коже животных разных видов // Деп. В ВИНТИ. 1993. < 1823-В93. С. 7.
6. Шаловой В.В., Перельмутер В.М., Ржевская З.И. Связь параметров линий Фойта с адаптивной системой // Деп. В ВИНТИ. 1993. < 1816-В93. С. 9.
7. Blakemore R.P. Magnetotactic bacteria // Science. 1975. V. 190. P. 377—379.
8. Frankel R.B., Blakemore R.P. Navigational compass in magnetic bacteria // J. Magn. Magn. Mater. 1980. V. 15. 18. P. 1562.
9. Iggo A., Gregory J.E., Proske U. The central designing of the electrosensory information in duck-bill // J. Physiol. 1992. V. 447. P. 449—465.
10. Jungerman R.L., Rosenblum B. Magnetic induction for the sensing of magnetic fields – An analysis // J. Theor. Biol. 1980. V. 87. P. 25.
11. Kalmijn A.J. Electric and magnetic field detection in elasmobranch fishes // Sciens. 1982. V. 218. P. 916.
12. Kirschvink J.L., Gould J.L. Biogenic magnetite as a basis for magnetic field detection in animals // BioSystems. 1981. V. 13. P. 181.
13. Kirschvink J.L. Birds, bees and magnetism: A new look at the old problem of magnetoreception // Trends Neurosc. 1982. V. 5. P. 160—167.
14. Kirschvink J.L., Kobayashi-Kirschvink K.A., Diaz-Ricci J.C., Kirschvink S.J. Magnetite in human tissues: mechanism for biological effects of weak ELF magnetic fields // Bioelectromagnetics. 1992. V. 1. P. 101—103.
15. Kirschvink J.L., Kobayashi-Kirschvink K.A., Woodward B.J. Magnetite biomineralization in human humor // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1992. V. 89. < 16. P. 7683—7687.
16. Leask M.J.M. A physicochemical mechanism for magnetic field detection by migratory birds and homing pigeons // Nature. V. 267. P. 144.
17. Liboff A.R. Interaction mechanisms of low-level electromagnetic fields and living systems. Oxford: Oxford Univ. Press, 1992. 130 p.
18. Murray R.W. Electroreceptor mechanisms: Relations of impulse frequency to stimulus strength and responses to pulsed stimuli in ampullae of Lorenzini of elasmobranchs // Physiol. (London). 1965. V. 1980. P. 592.
19. New J.G. Discharge and electrosensory reafferentation of the electric organ at skate // Biol. Bull. 1994. V. 187. < 1. P. 64—75.

Зеленцов В.И., Пеккер Я.С., Перельмутер В.М. и др. Упорядоченное расположение волосяных фолликулов (линии Фойта)...

20. *Rosenblum B., Jungerman R.L., Longfellow L.* In Magnetite biomineralization and magnetoreception in organisms / Ed. J.L. Kirschvink, D.S. Jones & B.J. MacFadden. New York: Plenum Press, 1985. P. 293—305.

21. *Schulten Z., Schulten K.* The generation, diffusion, spin motion and recombination of radical pairs in solution in the nanosecond time domain // *J. Chem. Phys.* 1977. V. 66. P. 4616.

Поступила в редакцию 15.01.2002 г.