

© 1996 г. Г.Ю. РИЗНИЧЕНКО, Т.Ю. ПЛЮСНИНА

## НЕЛИНЕЙНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ СУБКЛЕТОЧНЫХ СИСТЕМ – УСЛОВИЕ ОТКЛИКА НА СЛАБЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

На примере модели трансмембранного переноса ионов показана принципиальная возможность нелинейно организованной биологической системы отвечать на слабые низкочастотные электромагнитные излучения (10 В/м, 0,1–100 Гц). Взаимодействие биологической системы ионного переноса с внешним электромагнитным полем приводит к бифуркационным изменениям в системе. Следствием является изменение уровня концентраций ионов в примембранной области или возникновение автоколебательного режима.

Древние не сомневались в существовании связи между космическими и земными объектами, как живыми, так и неживыми. Современный индийский философ Шри Ауробиндо, следуя индийской философской традиции утверждает, что эта связь осуществляется посредством вибраций, испускаемых и воспринимаемых всеми телами [1].

В настоящее время имеются тысячи свидетельств связи космических и земных явлений. В [2] показано, что существуют корреляции между космическими событиями и состоянием человеческого организма, биолюминесцентной активностью бактерий [3], даже характеристиками радиоактивного распада [4]. В последние десятилетия появилось много доказательств в пользу того факта, что вибрации, связывающие все материальные объекты, представляют собой электромагнитные излучения (ЭМИ). Проблема естественнонаучного исследования состоит в том, чтобы понять *механизмы* взаимодействия поступающих из космоса часто весьма низкоинтенсивных электромагнитных полей с земными объектами. В этом случае можно было бы обоснованно говорить не о *корреляциях*, а о *взаимодействиях*.

При рассмотрении взаимодействия космических факторов с живыми системами нам представляется особенно важным тот факт, что биологические системы являются существенно *нелинейными*. Этот математический термин отражает несколько обстоятельств, связанных со структурной и функциональной организацией живого, в том числе открытость и удаленность живых систем от термодинамического равновесия. Процессы, которые протекают в таких системах, могут быть описаны нелинейными уравнениями и обладают свойствами, присущими нелинейным системам: здесь возможны мультистационарные, колебательные и квазистохастические режимы. Параметрические области отдельных паттернов поведения обладают бифуркационными границами, вблизи которых малые воздействия на систему могут приводить к качественному изменению характера их поведения. Именно с таких «нелинейных» позиций и следует рассматривать отклик живых систем на слабые космические воздействия.

Рассматривая взаимодействие электромагнитных волн с любой системой, мы всегда имеем дело с *резонансом*. Под резонансом в широком смысле слова мы понимаем некую комплементарность воспринимающей системы и поступающего сигнала, которая обеспечивается особым устройством воспринимающей системы. В зависимости от частоты сигнала это устройство может иметь различные пространственные и временные масштабы. ЭМИ различной частоты может вос-

приниматься на уровне макромолекул (видимый свет) или на уровне субклеточных систем, например клеточных мембран (низкие частоты). Механизмы такого восприятия совершенно различны.

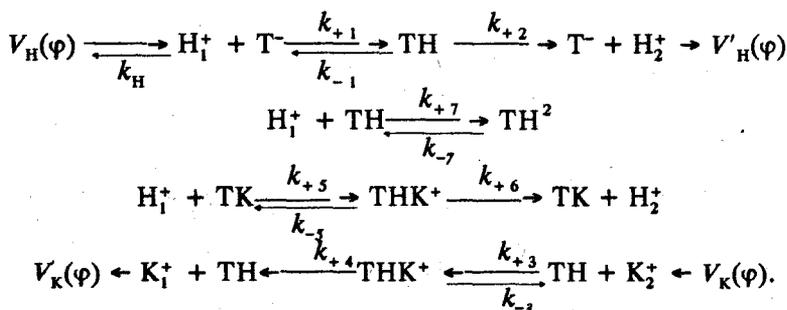
Физика взаимодействия видимого света с фотосинтетическими и зрительными системами довольно хорошо изучена. При фотосинтезе кванты света высокой энергии переводят молекулы хлорофилла в возбужденное состояние, затем эта энергия стабилизируется и утилизируется в виде энергии химических связей. Имеет место «энергетический» резонанс. При зрительном восприятии возбужденное состояние молекулы родопсина трансформируется в энергию нервных импульсов и через многоступенчатую систему регуляции и усиления вызывает сложные реакции высшего организма. Konig [5] приводит классический пример лошади, берущей препятствие в сумерках. Энергии всего нескольких фотонов «хватает» лошади для того, чтобы произвести прыжок через барьер благодаря мобилизации внутренней энергии животного с участием сложной системы нервной и гуморальной регуляции. Здесь можно говорить об «информационном» резонансе ЭМИ с воспринимающей живой системой.

При рассмотрении воздействия на живую систему низкочастотных ЭМИ возникает вопрос о том, что энергии падающего излучения слишком малы, чтобы внести изменения в молекулярную структуру воспринимающих систем. Мы предлагаем подойти к проблеме с иной, «не энергетической», точки зрения, рассматривать воспринимающую систему как нелинейную макросистему, обладающую различными типами поведения в зависимости от величины внутренних параметров. Под действием слабого периодического воздействия поведение такой системы может существенно трансформироваться, в особенности когда такое воздействие испытывает система, находящаяся вблизи бифуркационной границы своих параметров. Частота воздействия может не соответствовать разности энергетических уровней молекулярных структур, а быть «резонансной» для более крупномасштабных субклеточных систем, которым соответствуют гораздо более низкие характерные частоты.

Ниже на примере нелинейной системы трансмембранного ионного переноса показана принципиальная возможность субклеточной системы изменять характер своего поведения под влиянием слабого низкочастотного электрического поля. Подробно результаты исследования изложены в работах [6,7,8].

В качестве нелинейной системы трансмембранного ионного переноса рассматривается  $K^+ - H^+$  антипорт через клеточную мембрану с участием переносчика  $T^-$ , образующего с ионами комплексы  $TH$ ,  $TK$ ,  $THK^+$ ,  $TH^2$ . Константы скоростей соответствующих стадий:  $k_{\pm i}$  ( $i = 1, \dots, 7$ ). Предполагается, что скорости притока и оттока ионов в сферу реакции зависят от напряженности электрического поля в примембранной области:  $V(\varphi)$ .

Индексы 1 и 2 при концентрациях протонов  $H^+$  и ионов калия  $K^+$  соответствуют раствору по одну и по другую стороны мембраны.



Система уравнений, описывающая кинетику реакций после учета иерархии времен и преобразования уравнений к безразмерному виду [8] выглядит следующим образом:

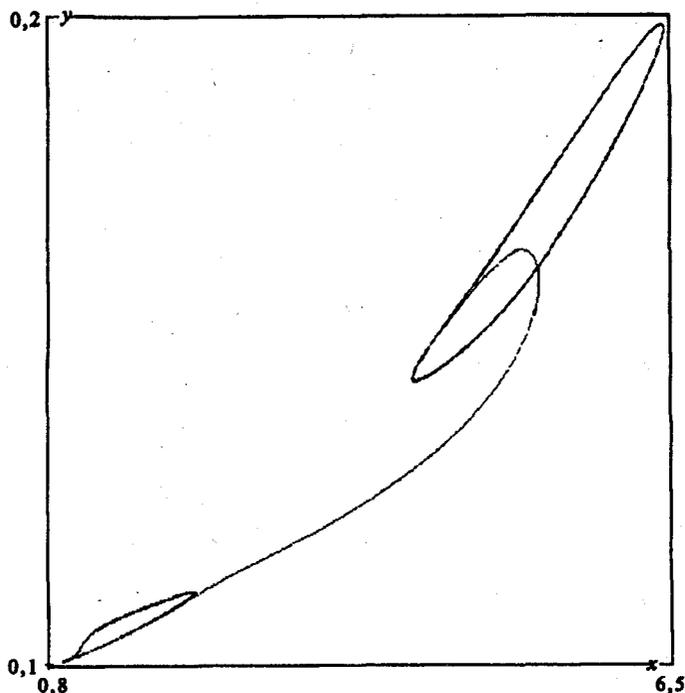


Рис.1. Фазовый портрет системы  $K^+/H^+$  антипорта для случая бистабильности при действии ЭМИ;  $x$  – безразмерная концентрация протонов;  $y$  – безразмерная концентрация ионов калия.  $a = 26,44$ ;  $b = 0$ ;  $c = 0$ ;  $d = 0,696$ ;  $V_x = 10,637$ ;  $k_x = -1$ ;  $V_y = -0,0325$ . При амплитуде воздействия  $A = 0,03$  и частоте  $\omega = 0,047$  система начинает совершать колебания вокруг одного устойчивого состояния, но со временем переходит в окрестность другого состояния

$$dx/dt = V_x(\varphi) - k_x x - x(a + by)/(1 + x + xy + cy + dx^2), \quad (1)$$

$$dy/dt = V_y(\varphi) - xy/(1 + x + xy + cy + dx^2),$$

где  $x$  и  $y$  – соответственно безразмерные концентрации протонов и ионов калия, параметрами системы являются сочетания констант реакций.

С учетом периодического синусоидального воздействия внешнего электрического поля на скорости движения ионов в примембранной области система примет вид:

$$dx/dt = V_x(\varphi)(1 + A \sin \omega t) - k_x x - x(a + by)/(1 + x + xy + cy + dx^2), \quad (2)$$

$$dy/dt = V_y(\varphi)(1 + A \sin \omega t) - xy/(1 + x + xy + cy + dx^2),$$

где  $A$  – безразмерная амплитуда, а  $\omega$  – безразмерная циклическая частота внешнего воздействия. По величине амплитуды можно судить о том, какую долю напряженности собственного электрического поля в примембранной области составляет напряженность внешнего электрического поля.

В зависимости от значений параметров система может иметь одну или три особые точки, тип и характер устойчивости которых определяются конкретными значениями параметров. Подробное исследование свойств системы приведено в [8]. Под действием слабого периодического поля в системе возникают небольшие колебания концентраций ионов вблизи устойчивых состояний системы. При изменении частоты воздействующего излучения возможны резонансные усиления колебаний, переключения из одного стационарного состояния в другое (рис.1)

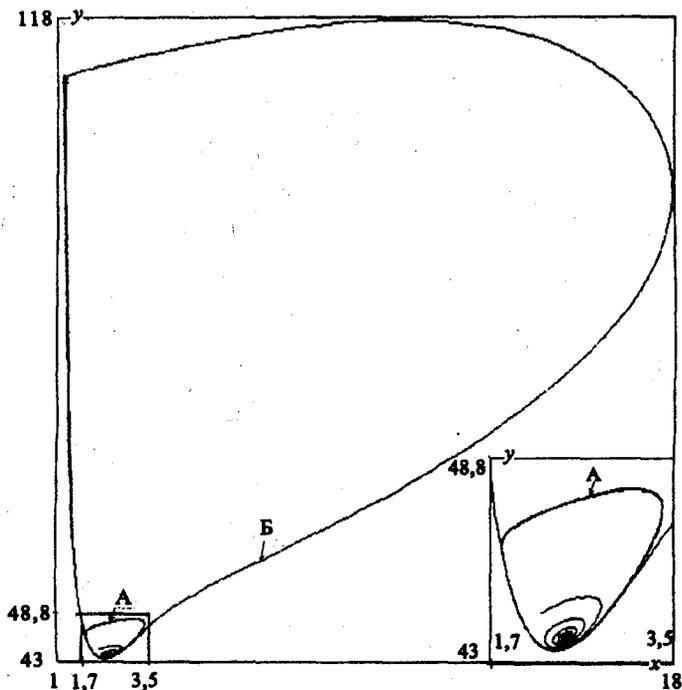


Рис.2. Фазовый портрет системы  $K^+/H^+$  антипорта в случае автоколебаний при следующих значениях скорости притока протонов:  $V_x = 0,5241$  (фокус);  $V_x = -0,5244$  (цикл А);  $V_x = -0,5245$  (цикл Б);  $x$  – безразмерная концентрация протонов;  $y$  – безразмерная концентрация ионов калия.  $a = 0$ ;  $b = 1$ ;  $c = 1$ ;  $d = 10$ ;  $k_x = 1$ ;  $V_y = 0,5$ . При нижнем критическом значении параметра  $V_x = 0,5241$ , соответствующему устойчивому состоянию фокус, слабое внешнее воздействие ( $A = 0,0003$   $\omega = 0,004$ ) переводит систему в режим автоколебаний (цикл А). Если воздействие осуществляется, когда система находится в режиме автоколебаний (при  $V_x$ , близком к бифуркационному), то происходит переход от колебаний малой амплитуды к колебаниям большой амплитуды т.е. переход от цикла А к циклу Б

или колебания, охватывающие оба этих состояния. Наконец, возможно появление предельных циклов малой и большой амплитуды (рис.2). Существуют критические (резонансные) частоты, на которых происходят описанные смены режима функционирования системы, вызывающие резкое изменение значений ионных концентраций. Оценка параметров внешнего излучения показывает, что при величине напряженности электрического поля в примембранной области порядка  $10^4$  В/см [9], внешние электрические поля порядка 10 В/см могут вызывать изменения величины внутриклеточного рН на десятые доли вплоть до единицы при резонансных частотах воздействия порядка  $0,1 + 100$  Гц. Известно большое число данных, свидетельствующих о высокой чувствительности клеточных процессов к величинам рН и ионной силы, обусловленной, по-видимому, влиянием этих величин на переходы периферических белков из связанного на мембране в свободное состояние в водной фазе [10]. Полученные масштабы изменения электрического поля сравнимы с изменениями напряженности электрического поля вблизи поверхности земли, вызываемые атмосферными явлениями [11]. Такого же порядка напряженности воздействующего поля использовались в экспериментах [12,13].

Однако важным последствием воздействия ЭМИ может оказаться не только изменение уровня концентраций ионов в примембранном слое, но и инициация автоколебательного режима или его прекращение. Значение ритмических процессов в жизнедеятельности организмов хорошо известно [14]. Часто различные

дисфункции организма связаны с нарушением того или иного биологического ритма. Тот факт, что при критических частотах ЭМИ является толчком к возникновению автоколебаний может в какой-то мере объяснить биологический эффект ЭМИ.

Огромное многообразие проявления биологического действия ЭМИ часто ставит исследователей в тупик при поиске механизмов такого действия. Сегодня еще не существует единой теории, способной охватить большую часть накопленного экспериментального материала. Предлагаемый в данной работе подход, основанный на нелинейности живых систем, способен, на наш взгляд, объяснить как разнообразие ответов биологических объектов, так и низкие энергии воздействующих излучений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шри Ауробиндо. Сатпрем. Л.: Изд-во ЛГУ, 1989.
2. Бреус Т.К., Халбег Ф., Корнелиссен Ж. // Тез. докл. 3-ей Междунар. конф. «Корреляции биологических и физико-химических процессов с солнечной активностью и другими факторами окружающей среды». Пушино, 1993. С.29.
3. Бержанская Л.Ю., Бержанский В.Н., Белоplotова О.Ю. и др. // Там же. С.19.
4. Шноль С.Э., Кутузов А.С., Удальцова Н.В. и др. // Там же. С.167.
5. Konig H. // *Electromagnetic Bio-Information*. / Eds. F.A. Popp, U. Warnke, H.L. Konig, W. Peschka. Munchen-Wein-Baltimore: Urban Schwarzenberg, 1989. P.42.
6. Ризниченко Г.Ю., Плюснина Т.Ю., Воробьев Т.Н., Аксенов С.И., Черняков Г.М. // *Биофизика*. 1993. Т.38. С.667.
7. Плюснина Т.Ю., Ризниченко Г.Ю., Аксенов С.И., Черняков Г.М. // *Биофизика*. 1994. Т.39. С.345.
8. Rznitchenko G.Yu., Plusnina T.Yu., Aksyonov S.I. // *Bioelectrochem. Bioenergetics*. 1994 (in press).
9. Tsong T.Y., Dao-Sheng Liu, Chauvin F. et al. // *Bioelectrochem. Bioenergetics*. 1989. V.21. P.319.
10. Аксенов С.И. Вода и ее роль в регуляции биологических процессов. М.: Наука, 1990.
11. Warnke U. // *Electromagnetic Bio-Information*. / Eds. F.A. Popp, U. Warnke, H.L. Konig, W. Peschka. Munchen-Wein-Baltimore: Urban Schwarzenberg, 1989. P.77.
12. Surpersu E.H., Tsong T.Y. // *J. Biol. Chem*. 1984. V.259. P.7155.
13. Dao-Sheng Liu, Astumian R.D., Tsong T.Y. // *J. Biol. Chem*. 1990. V.265. P.726.
14. Заславская Р.М. Хронодиагностика и хронотерапия. М.: Медицина, 1991.

Биологический факультет Московского  
государственного университета им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию  
29.09.1994

## NONLINEAR ORGANIZATION OF SUBCELLULAR SYSTEM IS A CONDITION OF RESPONSE TO APPLIED ELECTROMAGNETIC FIELDS

G.Yu. RIZNITCHENKO, T.Yu. PLUSNINA

*Biological Department M.V. Lomonosov Moscow State University*

An ability of a nonlinear biological system to respond to applied weak low frequency electromagnetic fields (10 V/m, 0,1–100 Hz) is shown using a model of transmembrane ion transport system. Interaction of the ion transport biological system with electromagnetic field leads to bifurcations in the system. As a consequence, the ion level is changed or self-sustained oscillations are initiated.