

УДК 577.35

МЕХАНИЗМ ВОЗДЕЙСТВИЯ КВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА СЕРОТОНИНЭРГИЧЕСКИЕ РЕЦЕПТОРЫ МОЗГА

© 2019 г. Е.Б. Шадрин, В.О. Самойлов*, А.В. Ильинский, Я.С. Кацнельсон**

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

*Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, 6

**Premier Annecto Technologies, 181 North Clinton Street, Doylestown Pennsylvania PA, USA

E-mail: shadr.solid@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 09.04.2019 г.

После доработки 09.04.2019 г.

Принята к публикации 08.05.2019 г.

Выявлен механизм резонансного воздействия излучения крайне высоких частот на мозг лабораторных животных. Установлено, что излучение крайне высоких частот высвобождает молекулу триптофана, инициируя многостадийный процесс фазовых превращений молекул альбумина, а именно, трехстадийный конформационный переход альбуминовой глобулы в клубковое состояние. Свободный триптофан, проникая в мозг с потоком ликвора через пространство Вирхова-Робина, усиливает в нейронной сети мозга выработку серотонина, воздействуя на серотонинэргические рецепторы.

Ключевые слова: КВЧ-излучение, термоимпедансметрия, ликвор, триптофан, серотонин, глобула, конформационные переходы.

DOI: 10.1134/S0006302919040197

Целью настоящей работы является выявление механизма воздействия сверхвысоко-частотного электромагнитного излучения на живой организм, принцип влияния которого остается малоизученным, несмотря на широкое применение данного вида излучений в практике. В частности, излучение миллиметрового диапазона (обозначаемое в литературе как излучение крайне высоких частот (КВЧ)) успешно применяется в дерматологии [1], а также в ряде других медицинских направлений [2].

Особое место занимают исследования нетипичных результатов воздействия КВЧ-излучения на живой организм, примером чего может служить вызываемая КВЧ-излучением модификация функций нервной деятельности лабораторных животных.

Из сказанного следует, что, ставя перед собой цель выявления механизма воздействия КВЧ-излучения на живой организм, разумно использовать параллельную совокупность двух направлений исследований: первое должно представлять собой контроль биохимической реакции организма на действие КВЧ-излучения. Второе долж-

но сводиться к анализу биофизическими методами параметров физических объектов, моделирующих элементы организма, определяющие его нервную деятельность. Наконец, можно полагать, что сопоставление результатов, полученных биохимическими и биофизическими, методами позволит прояснить детали механизма воздействия микроволнового излучения на живой организм.

КОНТРОЛЬ БИОХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ ОРГАНИЗМА НА ДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ КРАЙНЕ ВЫСОКИХ ЧАСТОТ

В экспериментах, проведенных согласно первому из указанных направлений, исследовали модификацию поведенческих функций лабораторных животных под влиянием КВЧ-излучения. С этой целью использовали три группы половозрелых крыс по двенадцать животных в каждой группе.

У животных первой группы вырабатывали условный рефлекс активного избегания токового болевого раздражения при одновременной подаче звукового сигнала. Для этого фиксировали число сочетаний условного раздражителя (звук с частотой 50 Гц и громкостью 60 дБ) и безусловного подкрепления раздражения (путем подачи на лапки животного в течение 6 с импульсного на-

Сокращения: КВЧ — крайне высокие частоты, ФП — фазовый переход.

пряжения амплитудой 100 мВ с частотой повторений 60 кГц и длительностью 8 мс), приводящего к выработке условного рефлекса. Результат: у животных первой группы условный рефлекс возникал после шести-семи сочетаний условного и безусловного раздражителей.

У животных второй группы осуществляли КВЧ-облучение кожных покровов черепа животного в течение 15 мин непосредственно перед выработкой условного рефлекса. Параметры КВЧ-излучения таковы: частота 54 ГГц ($\lambda = 5,6$ мм), плотность мощности излучения 300 мВт/см^2 , площадь облучаемой области головы животного около 2 см^2 .

Результат: обнаружено явление блокировки процесса выработки условного рефлекса. А именно, после КВЧ-облучения у животных второй группы в 50% случаев наблюдалось полное подавление способности к выработке условного рефлекса, а еще в 25% случаев наблюдалось затормаживание способности к его выработке.

Животным третьей группы за 20 мин до начала КВЧ-облучения вводили китрил, выполняющий, как известно, в живом организме функцию подавления выработки серотонина [3]. Затем в течение 15 мин осуществляли КВЧ-облучение покровов головы животных с теми же параметрами излучения, которые применяли для животных второй группы. Результат: действие КВЧ-излучения практически отсутствовало — в 96% случаев какого-либо затруднения выработки условного рефлекса не было зафиксировано.

На основании полученной информации сделан следующий вывод: у животных второй группы блокировка выработки условного рефлекса обусловлена дополнительным к физиологическому повышением серотонина в структурах мозга животного.

Кроме того, отдельные эксперименты показали, что воздействие на здоровое животное КВЧ-излучением погружает его в состояние заторможенности при одновременном снижении скорости реакции на внешние раздражители, снижение частоты дыхания и частоты пульса, что также характерно для действия на мозг повышенной концентрации серотонина [3].

Следует подчеркнуть, что, как показали дополнительные эксперименты, КВЧ-излучение не проникает сквозь кости черепа и не может, таким образом, непосредственно влиять на процессы, протекающие в мозгу животного.

БИОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ВЫСВОБОЖДЕНИЯ ТРИПТОФАНА В ЛИКВОРЕ В ПРОСТРАНСТВЕ ВИРХОВА-РОБИНА

Полученные результаты позволяют сформулировать предварительную модель механизма воздействия КВЧ-излучения на мозг лабораторных животных. Модель базируется на следующих положениях:

а) информация о воздействии КВЧ-излучения на кожные покровы головы животного эффективно проникает в мозг, что надежно фиксируется по изменению поведения животного после облучения;

б) блокировка способности к выработке условного рефлекса обусловлена вызванным облучением скачком концентрации серотонина в мозгу животного;

в) стрессорные воздействия на организм животного приводят к установлению новых связей в нейронной сети коры головного мозга, отвечающих за выработку условного рефлекса [4];

г) энергия кванта КВЧ-излучения (0,2 мэВ) в десятки раз меньше энергии тепловых флуктуаций ($kT = 30 \text{ мэВ}$) и в равновесном случае не в состоянии оказать воздействия на выработку серотонина в мозгу.

Суть предлагаемой в настоящей работе модели механизма блокировки способности к выработке условного рефлекса, основанная на приведенных положениях, сводится к следующему.

1. В пространстве Вирхова—Робина вокруг микрокапилляров [5] кожных покровов головы циркулирует цереброспинальная жидкость (ликвор), переносимая микрокапиллярами в мозг сквозь микроотверстия в костях черепа.

2. Под действием КВЧ-излучения высвобождается и становится химически активной молекула аминокислоты триптофана ($\text{C}_{11}\text{H}_{12}\text{N}_2\text{O}_2$), изначально зафиксированная внутри альбуминовой глобулы [6] и переносимая в мозг за счет циркуляции ликвора в пространстве Вирхова—Робина вокруг микрокапилляров

3. Триптофан присоединен к альбуминовой глобуле нехимическими ван-дер-ваальсовыми связями с энергией от 0,5 до 50 мэВ [7]. Разрыва указанных водородных связей тепловыми флуктуациями благодаря малой подвижности элементов глобулы [8] не происходит, несмотря на то, что энергия тепловых колебаний имеет величину $kT = 30 \text{ мэВ}$.

4. Воздействие электромагнитного КВЧ-излучения на цереброспинальную жидкость (ликвор) в кожных покровах головы является резонансным, то есть неравновесным: как при всяком резонансе [9], происходит накопление энергии КВЧ-квантов до уровня, превышающего энергию

тепловых флуктуаций и достаточного для разрыва соответствующих молекулярных связей.

5. Из аминокислоты триптофана ($C_{11}H_{12}N_2O_2$) нервными клетками мозга вырабатывается серотонин ($C_{10}H_{12}N_2O$). В организм животных триптофан, который они синтезировать не способны, поступает с пищей.

6. Высвобождение триптофана под действие КВЧ-излучения происходит, как будет показано ниже, в процессе конформационного перехода альбуминовой глобулы в клубковое состояние, поскольку альбуминовый клубок не способен удерживать триптофан [10].

Переход глобулы в клубок экспериментально подтвержден литературными данными по двухэтапному тушению триптофановой флуоресценции сыворотки альбумина при добавлении в раствор додецилсульфата натрия [10].

Результаты наших эксперимента указывают на трехстадийный характер денатурации альбумина. Первая стадия состоит в разрыхлении белковых глобул, вторая — в полном необратимом разворачивании в клубок аминокислотной цепи белка при фазовом переходе (ФП) «глобула—клубок», третья — в необратимом перколяционном переходе с образованием бесконечного клубкового кластера [11] и потерей им способности удержания молекулы триптофана [12]. Поскольку такой ФП необратим [12], это означает, что белковая цепь запоминает свое состояние. Ликвор на данной стадии процесса играет роль «элемента памяти» и переносит «свободный» триптофан под кости черепа, насыщая им нейронную сеть мозга. В нейронной сети вырабатывается большая, дополнительная к физиологической, доза серотонина.

Таким образом, описанный многостадийный процесс, приводящий к резкому повышению концентрации серотонина в мозгу, изначально инициируется КВЧ-излучением.

МЕХАНИЗМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ КРАЙНЕ ВЫСОКИХ ЧАСТОТ НА ЖИВОЙ ОРГАНИЗМ

Доказательство справедливости предлагаемой модели было получено в рамках второго направления при термоимпедансметрическом исследовании альбумина — главного белка спинномозговой жидкости.

Метод термоимпедансметрии. В альбумине методом термоимпедансметрии исследована цепочка фазовых превращений, приводящих к высвобождению триптофана. Преимущество метода термоимпедансметрии состоит в том, что он позволяет прецизионно контролировать термическую трансформацию усредненной диэлектрической проницаемости сплошной среды, каковой является раствор альбумина.

В данном разделе приводятся результаты исследования электрического отклика раствора сывороточного человеческого альбумина на воздействие переменного электрического поля частоты 3,6 МГц. Исследовалась температурная зависимость тангенса угла между вектором полного импеданса образца и вектором его емкостной составляющей. При этом предполагалось, что индуктивная составляющая образца ничтожно мала.

Постановка экспериментов выполнялась согласно алгоритму, позволявшему определять параметры ФП в молекулах глобулярного альбумина, помещенных в стандартный физиологический раствор.

Поскольку низкочастотная поляризуемость как альбуминовых глобул, так и альбуминовых клубков в составе ликвора мала [8], можно утверждать, что метод термоимпедансметрии контролирует макроскопический дипольный момент растворителя, поляризуемость молекул которого на порядки выше поляризуемости глобул и клубков. Это позволяет исследовать изменение состояния белковых глобул в процессе ФП «глобула—клубок» благодаря радикальному уменьшению при ФП усредненной диэлектрической проницаемости раствора альбумина ввиду резкого падения концентрации свободных молекул воды, сопровождающих ФП «глобула—клубок». Эти молекулы, вовлекаемые при ФП в структуру гидратной оболочки клубка, мощность которой на два порядка превышает мощность оболочки компактной глобулы, после совершения ФП теряют способность к ориентационной поляризуемости. В то же время деформационная поляризуемость молекул воды, как известно, мала [8]. Таким образом, ФП «глобула—клубок» провоцирует многократное падение совокупной диэлектрической проницаемости раствора альбумина.

Образцы для описываемых в данной работе экспериментов были получены последовательным разбавлением исходного препарата человеческого сывороточного альбумина производства НПО «Микроген» (Москва, Россия). Исходный препарат альбумина представлял собой 10%-й раствор в дистиллированной воде сывороточного альбумина, в который были добавлены хлористый натрий ($NaCl$, 150 ммоль/л) и каприловый натрий ($C_7H_{15}COONa$, 17 ммоль/л).

Для исследования электрических свойств раствора альбумина в настоящей работе была использована разработанная в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург) установка для измерения температурной зависимости электрического импеданса биологических жидкостей, детально описанная в работе [13].

При проведении измерений к электродам кюветы с раствором белка прикладывали переменное электрическое напряжение, что вызывало как протекание дрейфового тока, обусловленного движением ионов Na^+ , Cl^- и $\text{C}_7\text{H}_{15}\text{COO}^-$, окруженных своими гидратными оболочками, так и тока смещения, обусловленного ориентационной поляризуемостью свободных молекул воды.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате эксперимента была получена температурная зависимость разности фаз $\Delta\delta$ между полным током через измерительную кювету и емкостной составляющей тока, равной углу между вектором полного импеданса образца и вектором его емкостной составляющей.

Исследования показали, что эта зависимость представляет собой слабо возрастающую с температурой функцию, на которой в области температур 30–33°C (для концентрации альбумина 5 ат. %) наблюдается клявообразная структура в виде степенного спада сигнала с последующим резким его подъемом и выходом на линию прежнего слабого возрастания. Анализ показал, что этот участок может быть описан степенной функцией $\Delta\delta \sim 1 - (T - T_c)^{-\alpha}$, где $\Delta\delta$ — наблюдаемый сдвиг фаз, T — текущая температура, T_c — температура ФП, α — показатель степени, позиционируемый в физике ФП как критический индекс. Численные значения критических индексов, зависящие от концентрации альбумина в растворе, свидетельствуют в пользу перколяционной природы ФП, фиксируемого в методе термоимпедансметрии. Данный участок может быть экстраполирован к температуре $T_c = 38^\circ\text{C}$, что позиционируется в предлагаемой модели как температура ФП «глобула-клубок».

Обсуждение механизма воздействия КВЧ-излучения на живой организм. Плотная упаковка глобулы и прочность ее связей [8] радикально ограничивают способность пептидных диполей молекулы белка изменять свою ориентацию и величину дипольного момента под действием внешнего электрического поля [14] и, тем самым, экранировать внешнее поле. Основной причиной неспособности самой глобулы как целого обеспечить экранировку внешнего электрического поля, то есть создать уверенно регистрируемый отклик на внешнее электрическое воздействие, является низкая поляризуемость глобулы. Низкая поляризуемость, в свою очередь, обусловлена неспособностью глобулы ни к ориентации во внешнем электрическом поле, меняющемся с частотой 3,6 МГц, ни к ее дрейфу во внешнем поле, ни к деформационным изменениям глобулярного ди-

польного момента под действием внешнего поля [8].

Воздействие КВЧ-излучения на молекулы растворителя. В то же время способность к таким процессам молекул растворителя в десятки раз выше, чем у глобул, поскольку низкочастотная (не оптическая) диэлектрическая проницаемость совокупности свободных молекул воды равна $\epsilon = 81$. Для физиологического раствора, то есть смеси 0,9 % раствора NaCl и 0,3 % раствора $\text{C}_7\text{H}_{15}\text{COO}-\text{Na}$ в воде, ϵ на 5% меньше ($\epsilon = 76$) ввиду наличия гидратной оболочки вокруг ионов солей. Способность к экранировке внешнего поля возрастает с ростом температуры и концентрации солевого раствора [15]. Отсюда следует, что экранирующая способность растворителя играет принципиальную важную роль в наблюдении процесса трансформации молекул альбумина с ростом температуры.

В воде, не содержащей примесей, атом кислорода в составе молекулы воды находится в состоянии sp^3 -гибридизации, формируя тетраэдрическую конфигурацию гибридных орбиталей [16]. Две из них создают σ -связи с атомами водорода, имеющими высокую степень ионности благодаря смещению пика электронной плотности в сторону атома кислорода, а две оставшиеся заняты двумя неподеленными электронными парами, способными создавать водородные ($\text{O}-\text{H}$) связи с другими молекулами воды и формировать тетраэдрическую структурную сетку воды [15]. При растворении хлорида натрия или каприловокислого натрия в воде происходит их гидролиз: образование координационных связей между молекулами воды вокруг указанных ионов и самими ионами Na^+ , Cl^- или $\text{C}_7\text{H}_{15}\text{COO}^-$.

Воздействие КВЧ на ионы Na^+ , Cl^- и $\text{C}_7\text{H}_{15}\text{COO}^-$. Встраиваясь в тетраэдрическое окружение первой координационной сферы структурной сетки воды и замещая молекулу воды, ион Na^+ (Cl^- или $\text{C}_7\text{H}_{15}\text{COO}^-$) оказывается окруженным внутренним слоем гидратной оболочки. Внутренний слой гидратной оболочки состоит из четырех молекул воды [15]. В отличие от молекулы воды, окруженной четырьмя молекулами, все четыре связи иона Na^+ в первом слое являются координационными, так как ион Na^+ имеет электронную конфигурацию $1s^1(2)2s^1(2)2p^3(6)3s^1(0)3p^3(0)$ и находится в состоянии sp^3 -гибридизации. Верхние индексы указывают число атомных орбиталей, числа в скобках — количество электронов на них. Одна из $3s$ -орбиталей и три $3p$ -орбитали создают четыре пустые гибридные орбитали, принимающие на себя неподеленные пары молекул воды и создающие с

ними четыре координационные связи. Выигрыш энергии при образовании координационных связей с ионом Na^+ превосходит выигрыш при образовании водородных связей с молекулой воды [15]. Более высокие координационные сферы (последующие слои) гидратной оболочки вокруг иона Na^+ формируются за счет водородных связей молекул воды с молекулами воды первой сферы и между собой. Они содержат гораздо большее четырех число молекул воды (вторая — не менее 10, третья — более 30).

Анализируя состояние иона Cl^- с электронной конфигурацией $1s^1(2)2s^1(2)2p^3(6)3s^1(2)3p^3(6)-4s^1(0)4p^3(0)$, приходим к выводу, что предельная насыщенность электронами третьей электронной оболочки иона Cl^- обеспечивает возможность четвертой электронной оболочке создать четыре гибридные sp^3 -орбитали, также формирующие координационные связи с молекулами воды. Так образуется первый слой гидратной оболочки вокруг иона Cl^- . Аналогично этому возникают гидратные оболочки вокруг ионов $(\text{C}_8\text{H}_{15}\text{O}_2)^-$. Однако координационные связи иона хлора с молекулами воды менее прочны, чем иона Na^+ , и, тем более, иона $\text{C}_7\text{H}_{15}\text{COO}^-$ [8].

Из сказанного следует, что одна трехслойная гидратная оболочка как иона Na^+ , так и ионов Cl^- или $\text{C}_7\text{H}_{15}\text{COO}^-$ способна вывести из свободного состояния в физиологическом растворе несколько десятков молекул воды, переводя их в связанное состояние в составе гидратных оболочек и, тем самым, лишая их способности к ориентационной поляризуемости. Белковая глобула также окружена большим числом диполей, состоящих из молекул воды или ионов Na^+ , Cl^- или $(\text{C}_8\text{H}_{15}\text{O}_2)^-$, окруженных своими гидратными оболочками. Эти элементы формируют гидратную оболочку глобулы.

При наложении переменного электрического поля наблюдается импедансметрический сигнал, который в основном обусловлен ориентационной и в малой степени деформационной поляризуемостью свободных молекул воды. Действительно, поляризуемость глобулы низка, вклад дрейфа ионов $\text{C}_7\text{H}_{15}\text{COO}^-$, натрия и хлора, окруженных своими оболочками, в экранировку внешнего поля на сравнительно высокой частоте регистрации (3,6 МГц), хотя и отличен от нуля, также невелик ввиду их малой дрейфовой подвижности.

При росте температуры в условиях присутствия внешнего переменного электрического поля постепенно растет ориентационная поляризу-

емость молекул воды благодаря разрыхлению связей между ними за счет тепловой энергии kT , и сигнал экспериментально регистрируемого ФП слабо растет. На его фоне наблюдается структура в виде серии максимумов и минимумов. Этот сигнал связан с тем, что за счет энергии kT постепенно разрушается третичная структура глобулы. На начальном этапе данного процесса разрушения глобула становится рыхлой. Хаотичная термическая бомбардировка глобулы молекулами воды разрывает на начальном этапе наиболее слабые связи, стабилизирующие глобулу, и степень разрыхления глобулы нарастает [14]. При этом возникающие после разрыва связей свободные гидрофильные радикалы присоединяют молекулы воды — гидратируются, в результате чего объем разрыхленной глобулы возрастает. Наряду с этим упомянутые радикалы присоединяют и ионы $\text{C}_7\text{H}_{15}\text{COO}^-$, натрия и хлора, окруженные своими гидратными оболочками.

При этом целостность гидратной оболочки увеличенного размера, которая нарушается извлечением ее элементов внутрь разрыхленной глобулы, восстанавливается за счет дополнительно привлекаемых из физраствора свободных молекул воды. Таким образом, число связанных с глобулой молекул воды возрастает. Тем самым и без того ограниченное количество свободных элементов растворителя, способных экранировать внешнее электрическое поле, немонотонно изменяется, проходя через минимумы, обусловленные последовательным разрывом по мере роста kT трех типов внутренних связей глобулы различной прочности [14]. Это приводит к слабой волнообразной немонотонности кривой температурной зависимости полезного сигнала, наблюдаемой на эксперименте.

Переход «глобула—клубок». При приближении температуры к критической величине T_c ФП рыхлая глобула разворачивается в клубок с поперечником не менее чем на порядок превышающим поперечник глобулы (по оценкам, сделанным в работе [17], с 5 до 50 нм). Клубок остается внутри гидратной оболочки сильно увеличенного размера, модифицированной захватом извне элементов растворителя различных типов, т. е. происходит термическая активизация процесса присоединения элементов растворителя (физраствора) к возрастающей по объему гидратной оболочке. Описанные процессы имеют место при совершении первого (частично термически обратимого) ФП-перехода «глобула—клубок» [12]. Импедансметрическим методом при этом регистрируется резкий спад сигнала при совершении второго — геометрического (перколяционного) — ФП. Резкий спад сигнала обусловлен процессом образования бесконечного кластера из контактирующих друг с другом глобул в гидратных оболочках,

между которыми полностью отсутствует свободная вода. Таким образом, здесь совершается ФП, обусловленный нарастающим дефицитом свободных молекул воды в физрастворе из-за включения их в состав гидратных оболочек нарастающего количества разворачивающихся глобул. Это совершается в интервале температур 30–38°C (для одной из концентраций – 5,2 ат. % – в интервале 30–33°C).

При анализе экспериментальных результатов мы исходим из того, что фазовый переход «глобула–клубок» является фазовым переходом первого рода, так как требует для своего совершения подводимой извне энергии [18]. В частности, термической. При таком переходе в общем случае скачком меняются первичные параметры материала, такие как плотность, симметрия структурных элементов, коэффициент преломления, коэффициент поглощения и т.п. [19]. Для глобулы, разворачивающейся в клубок, данными параметрами являются ее плотность и коэффициент оптического поглощения в инфракрасной области в полосах поглощения воды, так как связанная вода гидратной оболочки имеет иной колебательный спектр, нежели свободная [12].

В то же время перколяционный ФП с образованием бесконечного клубкового кластера представляет собой геометрический ФП второго рода, не требующий подведения энергии [11,20], а требующий лишь создания условий для своего совершения в виде формирования элементов новой фазы в толще старой. При ФП второго рода скачком меняются вторичные параметры материала: теплоемкость (dQ/dT), сжимаемость (dV/dP), электрическая восприимчивость ($dP_{\text{дип}}/dE_{\text{эл}}$) [18]. Для раствора белков вторичным параметром является меняющаяся электрическая восприимчивость системы ($dP_{\text{дип}}/dE_{\text{эл}}$), что использовано нами при постановке эксперимента.

Оба рода ФП характеризуются при приближении к точке перехода степенной (критической) зависимостью параметра порядка. Для перехода «глобула–клубок» параметром порядка служит плотность тех связей в глобуле, которые разрушаются при разворачивании в клубок [7].

Величины критических индексов (показатели степени упомянутых выше степенных зависимостей) для ФП первого рода лежат в области «малых» значений критических индексов около 0,001–0,01, тогда как величины критических индексов ФП второго рода лежат в области «больших» значений критических индексов в диапазоне 0,3–2,7. Такие значения критических индексов типичны для теории протекания (перколяции) [11], что и наблюдается нами в термимпедансметрических экспериментах.

ВЫВОДЫ

Резюмируя, следует сказать, что в настоящей работе предложена модель механизма инициирования скачка концентрации серотонина в мозге животного под действием КВЧ-излучения благодаря активизации серотонинэргических рецепторов мозга. Модель сформулирована на базе сопоставления совокупности результатов, полученных при исследованиях ликвора как биохимическими, так и биофизическими методами.

Основные положения модели состоят в следующем.

1. Под резонансным воздействием квантов КВЧ-излучения становится химически активным триптофан ($C_{11}H_{12}N_2O_2$), переносимый в мозг животного за счет циркуляции ликвора в пространстве Вирхова–Робина вокруг микрокапилляров кожных покровов головы.

2. Серотонинэргическими рецепторами мозга из триптофана вырабатывается дополнительное к физиологическому количество серотонина ($C_{10}H_{12}N_2O$).

3. Высвобождение триптофана под действием КВЧ-излучения происходит в процессе трехстадийного конформационного перехода альбуминовой глобулы в клубковое состояние.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г. Ю. Курников, А. В. Корнаухов, Н. К. Никулин и др., Миллиметровые волны в биологии и медицине, № 1 (13), 38 (1999).
2. О. В. Бецкий, Н. Д. Девятков и Н. Н. Лебедева, Биомедицинская радиоэлектроника, № 7, 3 (2000).
3. З. В. О. Самойлов, Е. Б. Шадрин, Е. Б. Филиппова и др., Биофизика **60** (2), 377 (2015).
4. С. Б. Ступина и А. О. Филиппов, в сб. *Физиология высшей нервной деятельности и сенсорных систем* (Высшее образование, Москва, 2006), вып. 3, сс. 191–199.
5. T. Brinker, E. Stopa, J. Morrison, and P. Klinge, *Fluids and Barriers of the CNS* **11**, 10 (2014). DOI: 10.1186/2045-8118-11-10
6. И. М. Власова и А. М. Салецкий, Химич. физика **28** (12), 66 (2009).
7. А. С. Давыдов, *Биология и квантовая механика* (Наук. думка, Киев, 1979).
8. М. В. Волькенштейн, *Биофизика* (Наука, М., 1988).
9. С. Г. Калашников, *Электричество* (Физматлит, М., 2003).
10. R. Bito, T. Shikano, and H. Kawabata, *Biochim. Biophys. Acta* **1646**, 100 (2003).
11. А. Л. Эфрос, *Физика и геометрия беспорядка* (Наука, М., 1982).

12. А. В. Финкельштейн, *Физика белковых молекул* (Институт компьютерных исследований, Москва—Ижевск, 2014).
13. А. В. Ильинский, Н. Е. Иванова, Е. Б. Шадрин и Н. Л. Юткина, Патент на изобретение № 2205392, 27.05.2003.
14. А. В. Финкельштейн и О. Б. Птицын, *Физика белка* (КДУ, М., 2012).
15. G. Hoffner and P. Djian, *Biochemie* **84**, 273 (2002).
16. М. А. Зиганшин и В. В. Горбачук, *Курс лекций по физической и коллоидной химии* (Изд-во Каз. ун-та, Казань, 2007).
17. А. Ю. Гросберг и А. Р. Хохлов, *Статистическая физика макромолекул* (Наука, М., 1989).
18. Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц, *Теоретическая физика*, Т. 5 (Наука, М., 1988).
19. В. Ф. Гантмахер и В. Т. Долгополов, *Успехи физ. наук* **178** (1), 3 (2008).
20. Б. И. Шкловский и А. Л. Эфрос, *Успехи физ. наук* **117** (3), 401 (1975).

A Mechanism of the Influence of Microwave Radiation on Serotonergic Receptors in Brain

Е.В. Shadrin*, V.O. Samoilov, A.V. Ilinskiy*, and Ya. S. Katsnelson*****

**Ioffe Physical-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, ul. Politekhnikeskaya 26, 194021 Russia*

***Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, nab. Makarova 6, St. Petersburg, 199034 Russia*

****Premier Annecto Technologies, 181 North Clinton Street, Doylestown Pennsylvania PA, USA*

The mechanism of the resonance effect of microwave radiation on the brains of laboratory animals is revealed. It has been established that microwave radiation releases a tryptophan molecule, initiating a multi-stage process of phase transformations of albumin molecules, namely, a three-stage conformational transition of the albumin globule to the glomerular state. Free tryptophan, penetrating into the brain with the flow of cerebrospinal liquid through Virchow-Robin space, increases the production of serotonin in the neural network of the brain, affecting serotonergic receptors.

Keywords: microwave radiation, thermoimpedance, liquor, tryptophan, serotonin, globule, conformational transitions