



особенности в диапазоне ТГц волн. Поэтому многоплановые исследования нейронных сетей в указанной области могут быть чрезвычайно полезны для выяснения механизма быстрых процессов, происходящих в нервных системах.

В настоящей работе с помощью ТГц-спектрометра во временной области экспериментально исследованы некоторые электродинамические параметры нейронных сетей различных образцов, взятых из спинного мозга животного, в терагерцовом диапазоне частот под воздействием внешнего напряжения.

**2.Материалы и методы.** Хорошо известно, что спинной мозг позвоночных животных является частью центральной нервной системы, состоящей из серого и окружающего его белого вещества. Белое вещество содержит пучки нервных волокон, которые передают информацию вверх и вниз, соединяя разные части тела друг с другом и с мозгом. В качестве образцов для исследований были выделены слои белого вещества из разных частей спинного мозга животного (свиньи и овцы), которые помещались в кювету толщиной около 100 мкм, сделанной из политетрафторэтилен-прозрачного во всем терагерцовом диапазоне частот. Таким образом формируются образцы для исследования, размеры которых определяются размерами кюветы:  $\sim 20\text{мм} \times 20\text{мм} \times 0.1\text{мм}$ , как показано на рис.1.

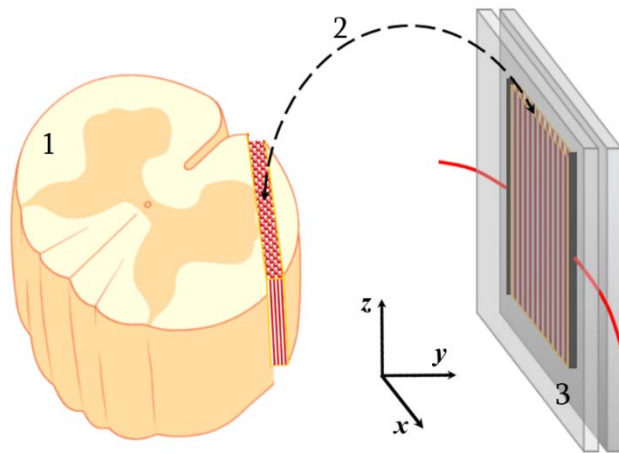


Рис.1. Образец спинного мозга: 1 – отрезок спинного мозга, 2 – исследуемый образец, 3 – кювета.

Для изучения характеристик нервных тканей спинного мозга в ТГц диапазоне в условиях приложенного внешнего напряжения в кювете, на расстоянии  $\sim 15$  мм друг от друга, были смонтированы вольфрамовые электроды (см. рис. 1), для подачи напряжения к образцу.

Исследования проводились с помощью экспериментальной установки на базе ТГц-спектрометра во временной области Menlo Systems LAC 1550. Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

Сигналы ТГц-спектрометра во временной области представляют собой сверхкороткие (длительностью около 1 пс) линейно поляризованные видеоимпульсы, которые при прохождении через образец задерживаются и искажаются в зависимости от параметров исследуемого образца. Основные электродинамические параметры образца (показатель преломления, коэффициент поглощения и др.) определяются путем сравнения временных форм, попадающих на образец и проходящих через него импульсов и их спектров.

Обработка и анализ экспериментальных результатов проводились с помощью специально разработанной компьютерной программы.

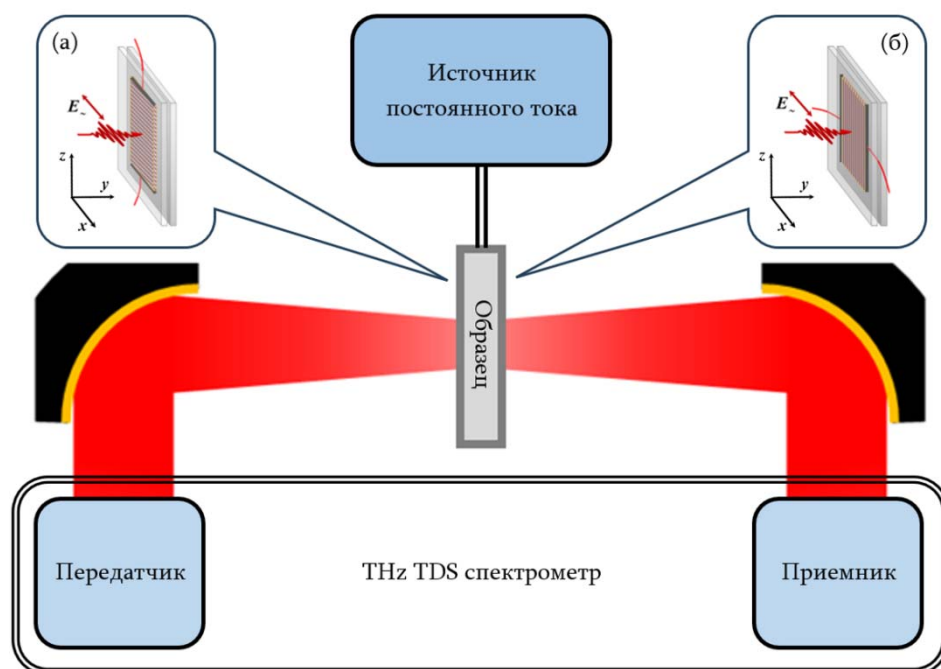


Рис.2. Блок-схема экспериментальной установки: (а) нервные волокна образца расположены параллельно электрическому полю ТГц излучения  $E_z$ , (б) – перпендикулярно  $E_z$ .

**3. Результаты и обсуждения.** Образцы спинного мозга сначала исследовались в отсутствие напряжения. На рис.3.(а) представлены временные формы ТГц импульсов, проходящих через пустую кювету (кривая 1) и кювету, заполненную образцом спинного мозга (кривая 2) толщиной 0.1 мм, в результате анализа которых определялись показатель преломления и поглощение образца.

Частотные зависимости показателя преломления и поглощения представлены на рис.3.(б), из которого видно, что в ТГц диапазоне, начиная с  $\sim 0.2$  ТГц, спинной мозг имеет достаточно сильное поглощение. Поглощение слоя толщиной 0.1 мм на частоте 0.25 ТГц составляет  $\sim 5$  дБ, оно

увеличивается с увеличением частоты, и на частоте 2 ТГц уже превышает 25 дБ (см. рис.3.(б)). Что касается показателя преломления, то он близок к 4 в низкочастотной области ТГц диапазона и монотонно убывает с ростом частоты, приближаясь к  $\sim 3.6$ . Следует отметить, что образцы спинного мозга не имели каких-либо заметных особенностей, и независимо от ориентации к плоскости поляризации ТГц излучения, указанные выше параметры близки параметрам, представленным на рис.3.(б).

По оценкам, плотность нервных волокон в поперечном сечении образца составляет  $10^2 \div 10^3 \text{ мм}^{-2}$ . Поэтому для открытия узлов Ранвье необходимо подать на электроды напряжение 100 В. Действительно, как и в нашей предыдущей работе [17], изменение параметров исследуемых образцов наблюдается при расположении нервных волокон образца спинного мозга параллельно электродам кюветы и подаче на электроды напряжения около 100 В. Однако следует отметить, что такое изменение наблюдается только тогда, когда нервные волокна образца расположены в направлении  $x$ , т. е. параллельно электрическому полю ТГц излучения  $E_z$  (положение (а), см. рис. 2). В противном случае (положение (б), когда нервные волокна расположены в направлении  $z$ , перпендикулярно  $E_z$ ), даже при приложении достаточно больших напряжений, заметных изменений поглощения и показателя преломления образца не происходят.

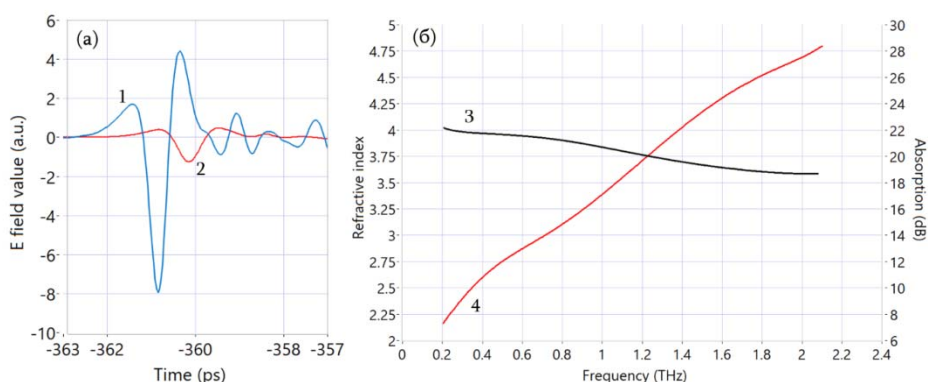


Рис.3. (а) временные формы ТГц импульсов, проходящих через пустую кювету толщиной 0.1 мм (кривая 1), и через кювету, заполненную образцом спинного мозга (кривая 2), (б) частотные зависимости показателя преломления (кривая 3) и поглощения образца спинного мозга толщиной 0.1 мм (кривая 4).

Изменения электродинамических параметров образцов зарегистрировались, поместив образцы в положение (а) на пути ТГц пучка терагерцового спектрометра во временной области. Параметры разных образцов,

взятых из спинного мозга, при приложении напряжения отличаются друг от друга, но все образцы демонстрируют схожие закономерности.

На рис.4 представлены временные формы ТГц импульсов, проходящих через два разных образца, и соответствующие им спектры в отсутствие напряжения (1) и при наличии напряжения 100 В через 6 минут после приложения напряжения (2).

В случае образца 1 наблюдается глубокий резонанс в низкочастотной области ТГц диапазона, а в высокочастотной области - значительное увеличение спектральных компонент, которое на частоте 2 ТГц достигает до 20 дБ. В случае 2-го образца это увеличение начинается с 0.4 ТГц и вблизи 2 ТГц составляет 5 дБ. Следует отметить, что после подачи напряжения резонансная частота с течением времени смещается в сторону низких частот, и через некоторое время (в случае 1-го образца ~6 мин) смещение прекращается. После снятия напряжения, примерно через 1 час параметры образцов восстанавливаются.

Изменения показателей преломления образцов под действием напряжения показаны на рис. 4г. Показатель преломления 1-го образца уменьшается в зависимости от частоты в области частот выше резонансной, а у 2-го образца показатель преломления уменьшается во всем наблюдаемом диапазоне. Можно предположить, по-видимому, что резонанс возникает также и во 2-м образце, частота которого лежит в более низкочастотной области, вне диапазона обзора.

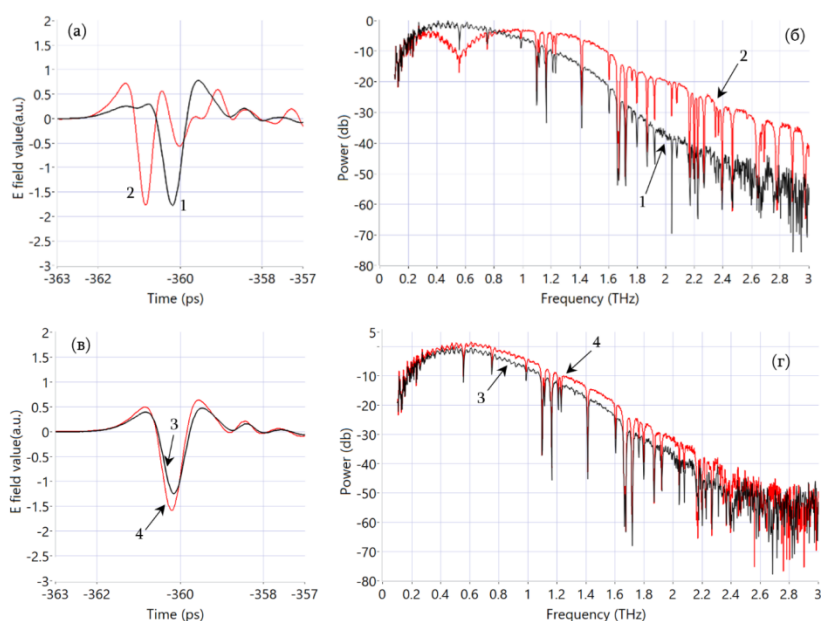


Рис.4. Временные формы ТГц импульсов, проходящих через кювету – (а), заполненную первым образцом спинного мозга до подачи напряжения (кривая 1) и через 6 мин после подачи напряжения (кривая 2), (б) – соответствующие спектры, (в), (г) – временные формы и спектры ТГц импульсов для второго образца.

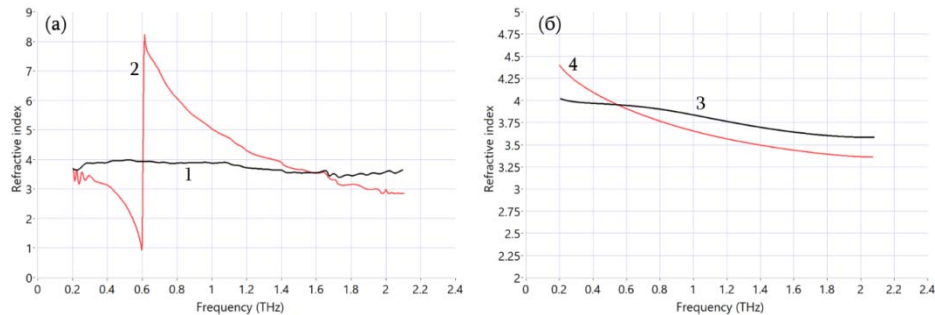


Рис.5. Частотные зависимости показателей преломления: для первого образца – (а) до подачи напряжения (кривая 1), и через 6 мин после подачи напряжения (кривая 2), (б) – для второго образца.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что под воздействием достаточно большого напряжения, по-видимому, происходит открытие каналов узловых перехватов Ранвье нервных волокон спинного мозга, благодаря чему нервные волокна превращаются в специфические проводы, а весь образец - в дифракционную решетку, состоящую из этих проводов.

Следует отметить, что значительные изменения ТГц импульсов (в частности, заметное увеличение высокочастотных составляющих в спектре), при прохождении через образец после приложения напряжения, не могут быть объяснены только резонансом или увеличением прозрачности образца (уменьшением поглощения). Поэтому для полного понимания процессов, происходящих в нервных системах, и, в частности, в спинном мозге, необходимы дополнительные всеобъемлющие и детальные исследования.

Ереванский государственный университет  
e-mail: armenm@ysu.am

**Т. Н. Оганесян, А .О. Макарян, академик Р. М. Мартиросян**

### **Исследование параметров нейронной системы спинного мозга в терагерцовой области частот**

Экспериментально исследованы электродинамические параметры нервных волокон спинного мозга животного в терагерцовом диапазоне электромагнитных волн (0.2 – 2 ТГц) под воздействием внешнего напряжения. Наблюдалось резонансное поглощение в низкочастотной области наблюдаемого диапазона. Предполагается, что под воздействием достаточно высокого напряжения раскрываются узлы Ранвье нервных волокон спинного мозга, благодаря чему нервные

волокна превращаются в специфические провода, а весь образец – в дифракционную решетку, состоящую из этих проводов.

**S. Ն. Հովհաննիսյան, Ա. Հ. Մակարյան, ակադեմիկոս Ռ. Մ. Մարտիրոսյան**

**Ողնուղեղի նյարդային համակարգի պարամետրերի հետազոտումը  
տերահերցային հաճախությունների տիրույթում**

Փորձնականորեն հետազոտվել են կենդանու ողնուղեղի նյարդային հյուսվածքների էլեկտրադինամիկական պարամետրերը էլեկտրամագնիսական ալիքների տերահերցային տիրույթում (0.2 - 2 ՏՀց)՝ արտաքին լարման ազդեցության դեպքում: Դիտարկվող տիրույթի ցածրհաճախային մասում դիտվել է ռեզոնանսային կլանում: Ենթադրվում է, որ բավականաչափ բարձր լարման ազդեցության տակ բացվում են ողնուղեղի նյարդաթելերի Ռանվիեի սեղմվածքները, ինչի պատճառով նյարդաթելերը վերածվում են յուրահատուկ հաղորդալարերի, իսկ ամբողջ նմուշը՝ այդ հաղորդալարերից բաղկացած դիֆրակցիոն ցանցի:

**T. N. Hovhannisyán, A. H. Makaryán, academician R.M. Martirosyan**

**Study of the parameters of the spinal cord neural system in the  
terahertz frequency range**

In this work, we experimentally studied the electrodynamic parameters of the nerve fibers of the animal's spinal cord in the terahertz range of electromagnetic waves (0.2 – 2 THz) under the influence of external voltage. Resonant absorption was observed in the low-frequency region of the observed range. It is assumed that under the influence of a sufficiently high voltage, the nodes of Ranvier of the nerve fibers of the spinal cord open, due to which the nerve fibers turn into specific conducting wires, and the entire sample becomes a diffraction grating consisting of these wires.

**Литература**

1. *A. L. Hodgkin, A. F. Huxley*, Nature 144 (1939) 710-711.
2. *Christof Koch*, Biophysics of Computation: Information Processing in Single Neurons (New York, Oxford University Press, 1999).
3. *R. R. Traill*, Toward a theoretical explanation of electro-chemical interaction in memory use: The postulated role of infra-red components and molecular evolution (Brunel University, Institute of Cybernetics, UK, 1977).
4. *R. R. Traill*, Speculations in Science and Technology 11(3) (1988) 173-181.
5. *N. D. Devyatkov*, Uspekhi Fizicheskikh Nauk 110 (1973) 453-454.
6. *A. Fraser, A. Frey*, Biophysical Journal 8 (1968) 731-734.
7. *L. B. Cohen et al*, Nature 218 (1968) 438-441.
8. *M. H. Sherebrin*, Nature New Biology 235 (1972) 122-124.
9. *L. I. Brusilovsky et al*, Journal of Radio Electronics 2 (2020) 1684-1719.
10. *F. W. Cope*, Bulletin of Mathematical Biology 35 (1973) 627-644.
11. *Z. Xiang et al*, Nano Research 14 (2020) 590-600.

12. *A. Zangari*, Scientific Reports 8 (2018) 539.
13. *S. Kumar*, Scientific Reports 6 (2016) 36508.
14. *L. Guo et al*, Nanobiotechnology, Electromagnetic characteristics of in vivo nerve fibers at the terahertz-far-infrared band, 2022.
15. *G. Liu et al*, Advanced Functional Materials, 29(7) (2019), 1807862.
16. *Y. S. Liu et al*, Sci. China-Phys. Mech. Astron. 63 (2020) 274211.
17. *T. Hovhannisyanyan, A. Makaryan*, Armenian Journal of Physics, 17(1) (2024) 17-20.