



УДК 616.28-009-072.7

EDN KNSGET

<https://www.doi.org/10.33910/2687-1270-2024-5-4-357-364>

Восстановление потенциала действия на первом слуховом нейроне слабым магнитным полем при тугоухости

Б. Ф. Щёголев^{✉1}, С. В. Сурма¹, И. И. Попова², Д. С. Клячко³

¹ Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, 199034, Россия, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 6

² Городской гериатрический медико-социальный центр,
190103, Россия, г. Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, д. 148

³ Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи Минздрава РФ,
190013, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Бронницкая, д. 9

Сведения об авторах

Борис Федорович Щёголев, SPIN-код: [1239-3324](https://orcid.org/1239-3324), Scopus AuthorID: [6701534523](https://orcid.org/6701534523), ResearcherID: [J-6953-2018](https://orcid.org/J-6953-2018), ORCID: [0000-0001-5500-2837](https://orcid.org/0000-0001-5500-2837), e-mail: shcheg@mail.ru

Сергей Викторович Сурма, SPIN-код: [7059-0259](https://orcid.org/7059-0259), Scopus AuthorID: [36054909800](https://orcid.org/36054909800), ResearcherID: [AAC-8805-2022](https://orcid.org/AAC-8805-2022), ORCID: [0000-0003-4505-0995](https://orcid.org/0000-0003-4505-0995), e-mail: svs-infran@yandex.ru

Ирина Ивановна Попова, e-mail: surdolog_popova@mail.ru

Дмитрий Семенович Клячко, SPIN-код: [3639-0998](https://orcid.org/3639-0998), Scopus AuthorID: [57191095112](https://orcid.org/57191095112), ResearcherID: [B-8460-2016](https://orcid.org/B-8460-2016), ORCID: [0000-0001-5841-8053](https://orcid.org/0000-0001-5841-8053), e-mail: rip.tor@yandex.ru

Для цитирования: Щёголев, Б. Ф., Сурма, С. В., Попова, И. И., Клячко, Д. С. (2024) Восстановление потенциала действия на первом слуховом нейроне слабым магнитным полем при тугоухости. *Интегративная физиология*, т. 5, № 4, с. 357–364. <https://www.doi.org/10.33910/2687-1270-2024-5-4-357-364> EDN KNSGET

Получена 6 октября 2024; прошла рецензирование 8 ноября 2024; принята 11 ноября 2024.

Финансирование: Работа поддержана средствами федерального бюджета в рамках государственного задания ФГБУН Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН (№ 1021062411629-7-3.1.4 и № 1021062411645-5-3.1.8).

Права: © Б. Ф. Щёголев, С. В. Сурма, И. И. Попова, Д. С. Клячко (2024). Опубликовано Российским государственным педагогическим университетом им. А. И. Герцена. Открытый доступ на условиях лицензии CC BY-NC 4.0.

Аннотация. Нейросенсорная тугоухость может быть вызвана не только классическими поражениями звуковоспринимающего аппарата или центральных отделов слухового анализатора, но и проблемами на клеточном уровне в нейронах, в частности, первом слуховом нейроне. Такой проблемой может быть отсутствие или недостаточность величины потенциала действия (ПД) на нем. Разработана и создана аппаратура по неинвазивному применению слабого (менее 300 мкТл) переменного магнитного поля для воздействия на этот нейрон с целью активации потенциалзависимых Na⁺, K⁺ и Ca²⁺ ионных каналов. Последовательное открытие каналов приводит к деполяризации мембраны первого слухового нейрона, следствием чего является генерирование ПД на нем и восстановление его проводимости. Получен эффект улучшения слуха у испытуемых пациентов с нейрональной тугоухостью III и IV степени, использующих слуховые аппараты. Время воздействия переменного магнитного поля зависит от поставленного диагноза и возраста. Приведены и обсуждаются примеры улучшения слуха у взрослого пациента за один сеанс — 20 минут, улучшение составляло ~10 дБ, тогда как для детей 10-минутный сеанс давал улучшение ~20–40 дБ. Полученный после применения электромагнитной стимуляции новый порог чувствительности достаточно нестабилен и требует как дополнительных процедур, так и соответствующей акустической поддержки.

Ключевые слова: нейросенсорная тугоухость, потенциалзависимые ионные каналы, деполяризация мембраны, первый слуховой нейрон, потенциал действия, слабое переменное магнитное поле

Regeneration of first auditory neuron action potential by a weak magnetic field in patients with hearing loss

B. F. Shchegolev ¹, S. V. Surma¹, I. I. Popova², D. S. Klyachko³

¹ Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, 6 Makarova Emb., Saint Petersburg 199034, Russia

² City Geriatric Medical and Social Center, 148 Fontanka River Emb., Saint Petersburg 190103, Russia

³ St. Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech of the Ministry of Health of the Russian Federation, 9 Bronnitskaya Str., Saint Petersburg 190013, Russia

Authors

Boris F. Shchegolev, SPIN: 1239-3324, Scopus AuthorID: 6701534523, ResearcherID: J-6953-2018, ORCID: 0000-0001-5500-2837, e-mail: shcheg@mail.ru

Sergey V. Surma, SPIN: 7059-0259, Scopus AuthorID: 36054909800, ResearcherID: AAC-8805-2022, ORCID: 0000-0003-4505-0995, e-mail: sv-s-infran@yandex.ru

Irina I. Popova, e-mail: surdolog_popova@mail.ru

Dmitry S. Klyachko, SPIN: 3639-0998, Scopus AuthorID: 57191095112, ResearcherID: B-8460-2016, ORCID: 0000-0001-5841-8053, e-mail: rip.tor@yandex.ru

For citation: Shchegolev, B. F., Surma, S. V., Popova, I. I., Klyachko, D. S. (2024) Regeneration of first auditory neuron action potential by a weak magnetic field in patients with hearing loss. *Integrative Physiology*, vol. 5, no. 4, pp. 357–364. <https://www.doi.org/10.33910/2687-1270-2024-5-4-357-364> EDN KNSGET

Received 6 October 2024; reviewed 8 November 2024; accepted 11 November 2024.

Funding: The study was supported by the State funding allocated to the Pavlov Institute of Physiology Russian Academy of Sciences (No. 1021062411629-7-3.1.4, No. 1021062411645-5-3.1.8).

Copyright: © B. F. Shchegolev, S. V. Surma, I. I. Popova, D. S. Klyachko (2024). Published by Herzen State Pedagogical University of Russia. Open access under CC BY-NC License 4.0.

Abstract. Sensorineural hearing loss can result not only from damage to the auditory apparatus or central auditory pathways but also from cellular dysfunction at the neuronal level, particularly in the first auditory neuron. A key issue may involve the absence or inadequate generation of the action potential (AP) in this neuron. To address this, we have developed a device for the non-invasive application of a weak (less than 300 μ T) alternating magnetic field, designed to activate voltage-gated Na⁺, K⁺, and Ca²⁺ ion channels in the first auditory neuron. The sequential opening of these channels induces membrane depolarization, generating an AP and restoring neuronal conductivity. Improvement in hearing was observed in patients with neural hearing loss (degree III and IV) who use hearing aids. The exposure time to the alternating magnetic field varied depending on the diagnosis and the patient's age. This article reports a hearing improvement of approximately 10 dB in an adult patient following a single 20-minute session and a 20–40 dB improvement in children after a 10-minute session. However, the new sensitivity threshold achieved through electromagnetic stimulation remains unstable and requires further treatment sessions along with appropriate acoustic support.

Keywords: sensorineural hearing loss, voltage-gated ion channels, membrane depolarization, first auditory neuron, action potential, weak alternating magnetic field

Введение

Нейросенсорная тугоухость является достаточно широко распространенным заболеванием не только среди пациентов среднего и старшего возраста, но и среди детей. Подробное описание симптомов заболевания и способов его лечения, в том числе хирургических, изложено в медицинской литературе (Альтман, Таварткиладзе 2003; Преображенский 1978; Преображенский и др. 1955; Тишевской 2000). Причины возникновения нейросенсорной тугоухости далеко неоднозначны и могут возникать как на кохлеарном, так и на ретрокохлеарном

уровнях. Одной из наиболее важных причин возникновения этого заболевания является отсутствие генерации достаточного по величине потенциала действия (ПД) на первом слуховом нейроне и, как следствие, отсутствие передачи электрических импульсов на нем.

Генерация ПД напрямую связана с деполяризацией мембраны нервной клетки (Alberts et al. 2002). В свою очередь деполяризация этой мембраны осуществляется за счет срабатывания достаточного количества потенциалзависимых ионных Na⁺, K⁺ и Ca²⁺ каналов, каждый из которых представляет собой большую интегральную белковую структуру, расположенную в липидном

бислой мембраны нервной клетки. Строение Na^+ и K^+ каналов подробно описано в работах (Rosen 2003; Shen et al. 2007).

Вышеупомянутые ионные каналы распределены по мембране возбудимого нейрона далеко неравномерно (Мельников 2007). Ближе к началу аксона на соме расположены в основном Na^+ каналы, тогда как на самом теле сомы расположены преимущественно Ca^{2+} каналы. К соме примыкает дендритное дерево, в значительной мере покрытое как шипиками с синапсами, так и отдельными синапсами, которые расположены на самом дендритном стволе. Согласно опубликованным данным (Hoffman et al. 1997), потенциалзависимые ионные каналы присутствуют и на дендритах, которые за счет этих каналов тоже оказываются способными участвовать в генерации потенциала действия. В работе Женг с соавторами (Zheng et al. 2016) утверждается, что согласно полученным авторами экспериментальным данным возможно прямое воздействие переменного магнитного поля (МП) (без указания механизма) на белковые структуры Na^+ и K^+ каналов. Кроме того, отдельно упоминается важная роль молекул сиаловой кислоты, которые расположены на мембране возбудимого нейрона рядом с устьем потенциалзависимых каналов. При этом отмечается, что отрицательно заряженные фрагменты этих молекул могут отодвигаться/отворачиваться от устья канала под действием переменного МП, тем самым облегчая проход катионов к устью каналов.

Результаты наших совместных работ с Национальным медицинским исследовательским центром психиатрии и неврологии им. В. М. Бехтерева по купированию периферического нейрогенного хронического болевого синдрома (Сурма и др. 2018) показали, что такие слабые переменные МП при неинвазивном применении характеризуются неповреждающим способом воздействия и, что особенно важно, адресной частотной направленностью.

Все это заставило нас обратиться к применению слабых переменных магнитных полей (с величиной индукции менее 300 мкТл) для воздействия на первый слуховой нейрон с целью генерации ПД. При применении таких МП необходимо иметь в виду, что рассматриваемые нейроны находятся под одновременным воздействием двух полей — практически статического МП Земли, присутствующего в месте проведения экспериментов, и подаваемого извне регулируемого слабого низкочастотного переменного МП. Теоретические основы этой проблемы подробно рассматриваются в фунда-

ментальной работе В. Н. Бинги, в которой предлагается и обосновывается спиновый механизм рецепции переменного магнитного поля (Бинги 1995) биологическими объектами: «биологическая реакция на действие переменного МП обусловлена поглощением энергии МП ядерным спином протона (ядро ^1H) и преобразованием ее в энергию орбитальных степеней свободы. Энергия МП сначала преобразуется в энергию спиновых степеней свободы, а затем уже в энергию орбитального движения электронной подсистемы за счет спин-орбитального взаимодействия».

Основываясь на этой работе, можно предложить следующую модель воздействия слабого переменного МП на потенциалзависимые ионные каналы. Подаваемое извне переменное магнитное поле способно напрямую воздействовать на ядерные спины протонов белковой структуры поры каналов, преобразуясь в энергию спиновых степеней свободы, которая, в свою очередь за счет спин-орбитального взаимодействия преобразуется в энергию орбитального движения электронной подсистемы белковой структуры Na^+ и K^+ ионных каналов. Такое преобразование энергии в том числе затрагивает и электронные подсистемы S4 спиральных фрагментов, отвечающие за открывание и активацию Na^+ и K^+ ионных каналов (Rosen 2003). В этих фрагментах перестройки электронных подсистем с необходимостью вызывают изменения структурного характера, вызывающие открытие части таких каналов для прохождения катионов внутрь нейрона.

На этом пути первыми открываются Na^+ каналы (Ahmed, Wieraszko 2015), вслед за ними открываются K^+ каналы. И только затем открываются Ca^{2+} каналы (Мельников 2007), что приводит к активному поступлению катионов Ca^{2+} в клетку. В результате такой последовательности событий происходит перераспределение зарядов на внутренней и внешней поверхностях мембраны нервной клетки и, как следствие, деполяризация самой мембраны. Дополнительно к этому, как отмечается в работе (Lacroix et al. 2013), эффект повышения внутриклеточной концентрации катионов Ca^{2+} увеличивает возбудимость самих командных нейронов.

Требуется некоторое время на открытие достаточного количества потенциалзависимых ионных каналов и деполяризацию мембраны. В работе (Ahmed, Wieraszko 2015), проведенной на седалищном нерве, отдельно обращается внимание на то, что регистрация возникновение потенциала действия на нем наблюдается

только через 15 минут после наложения переменного МП. Возникшая деполяризация мембраны возбудимой нервной клетки генерирует образование потенциала действия на этой клетке, так что она становится способной передавать нервные информационные импульсы (Гайнутдинова и др. 2010).

Таким образом, решение поставленной задачи о неинвазивном восстановлении ПД на первом слуховом нейроне, а, следовательно, и восстановлении его проводимости, состояло в расчете, разработке и конструировании лабораторного образца установки для создания слабого регулируемого по частоте и интенсивности переменного магнитного поля (с величиной индукции менее 300 мкТл) и его экспериментальном применении для генерации ПД на этом нейроне с целью исправления нейросенсорной тугоухости III и IV степени, вызванной недостаточностью величины ПД на нем.

Материалы и методы

Метод лечения нейросенсорной тугоухости, вызванной отсутствием или недостаточностью по величине ПД на первом слуховом нейроне, основан на формировании внешнего слабого (менее 300 мкТл) переменного магнитного поля с заданными параметрами и подаче его в область расположения этого нейрона. Слабые переменные магнитные поля в диапазоне низких частот обладают способностью проникать в биологические среды и оказывать воздействие на генерацию ПД на первом слуховом нейроне по механизму, описанному выше. Значимость состояния проводимости первого слухового нейрона у млекопитающих обусловлена подачей на него с наружных волосковых клеток рецепторного потенциала за счет активных колебаний клеточного тела.

Для формирования требуемого слабого переменного магнитного поля была создана экспериментальная установка для электромагнитной стимуляции слуха (ЭМС); блок-схема и общий вид приведены на рисунках 1 и 2. В установке использованы следующие компоненты: генератор сигналов JDS6600 (Китай), усилитель сигналов VX-2.60 (Китай) с блоком питания HW-12v-500W (Россия) и соленоид-индуктор, выполненный на основе катушки без сердечника, с намоткой медным проводом ПЭВ-2 диаметром 0,69 мм и сопротивлением 14 Ом. Измерения магнитного поля производили магнитометром Fluxmaster (StefanMayer-Instruments, Dinslaken, Germany).

Исследования проводили в медицинских учреждениях с разрешения локального Этического комитета и при наличии обязательного информированного согласия пациентов. Пациенты, имеющие диагноз нейросенсорной тугоухости III и IV степени, давшие согласие на участие в медицинских исследованиях, проходили проверку на величину ПД на первом слуховом нейроне с помощью процедуры КСВП (коротколатентные слуховые вызванные потенциалы), а также обязательную независимую проверку слуха стандартным методом тональной аудиометрии до и после процедуры электромагнитной стимуляции (ЭМС) слуха. Процедура ЭМС состояла в поднесении индуктора (без прикладывания) к уху и ручном варьировании частоты подаваемого МП до достижения у пациента отчетливо слышимого звукового сигнала, который воспринимается пациентом как естественный акустический при минимально возможной величине индукции МП (менее 300 мкТл). Сравнение результатов аудиометрии до и после применения МП позволяло судить как о текущем изменении слуховой чувствительности пациента, так и о тенденции ее изменения за несколько сеансов.

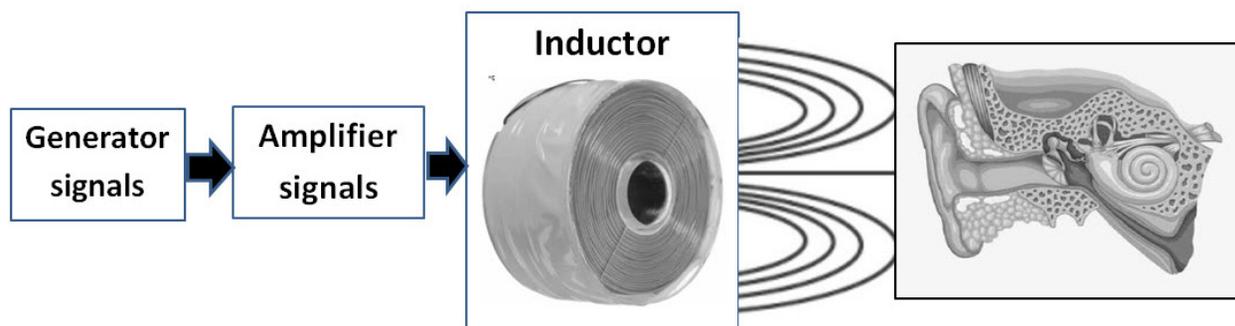


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для электромагнитной стимуляции слухового нейрона

Fig. 1. Block diagram of the experimental setup used for electromagnetic stimulation of the auditory neuron



Рис. 2. Фото экспериментальной установки для электромагнитной стимуляции слуха.
Фото Б. Ф. Щёголева, 2024

Fig. 2. Photograph of the experimental setup for electromagnetic hearing stimulation.
Photo by B. F. Shchegolev, 2024

Результаты и обсуждение

В результате воздействия слабого переменного магнитного поля на первый слуховой нейрон нами был обнаружен эффект значительного улучшения слуха у испытуемых пациентов с нейрональной тугоухостью III и IV степени и недостаточностью величины или отсутствием ПД на первом слуховом нейроне. Причем наиболее значимые улучшения слуха наблюдались у детей, по сравнению со взрослыми пациентами.

Приведем результаты воздействия процедуры ЭМС для двух наиболее характерных экспериментов, осуществленных на пациентах различного возраста. Пациент № 1, мужчина, 50 лет, нейросенсорная тугоухость IV степени, носит слуховой аппарат. Среднее увеличение чувствительности слуха за один сеанс длительностью 20 минут составляло порядка ~10 дБ. Пациент № 2, ребенок, 7 лет, нейросенсорная тугоухость IV степени, носит слуховой аппарат. Среднее увеличение чувствительности слуха за один сеанс длительностью 10 минут составляло порядка ~30 дБ. Аудиометрический контроль слуха до и после проведения процедуры ЭМС осуществлялся в области речевых частот

(500–4000 Гц) на сертифицированном оборудовании Санкт-Петербургского ГБУ здравоохранения «Городской гериатрический медико-социальный центр», а также Санкт-Петербургского научно-исследовательского института уха, горла, носа и речи МЗ РФ.

Необходимо отметить, что использование внешних слабых магнитных полей (МП) для лечения нейросенсорной тугоухости имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать. Во-первых, возраст пациента, от которого зависит интенсивность воздействия и время экспозиции. Для детей величины таких параметров значительно ниже и меньше в среднем в два-три раза. Например, для детей минимальное время экспозиции составляет 10 минут, у взрослых пациентов оно увеличивается до 20–30 минут. Регулируемая интенсивность воздействия МП обычно не превышала 100–150 мкТл и определялась по минимальному, но устойчивому слуховому восприятию действия накладываемого слабого переменного МП, которое после воздействия на первый слуховой нейрон далее воспринимается как естественное акустическое.

Время последствия процедуры, т. е. сохранения повышенной слуховой чувствительности, напрямую зависит от поставленного

диагноза и возраста. Если пациент постоянно носит слуховой аппарат, то перед началом процедуры лечения слуховой аппарат обязательно снимается, чтобы избежать конфликта между высоким по интенсивности акустическим сигналом, реакция на который вызывает повышение порога чувствительности слухового нейрона, и реакцией на электромагнитное воздействие, вызывающей понижение порога чувствительности слухового нейрона. Полученный после экспозиции электромагнитной стимуляции новый порог чувствительности достаточно не стабилен и со временем испытывает тенденцию к возвращению к старому порогу чувствительности. У детей эти временные интервалы более короткие, вследствие более высокой скорости биохимических реакций в организме, и могут составлять всего несколько часов. У взрослых пациентов такие интервалы могут достигать нескольких дней. Если же пациент носит слуховой аппарат и после процедуры электромагнитной стимуляции сразу возвращается к его использованию, то практически в течение очень короткого времени происходит возврат порога слуховой чувствительности на старый, более высокий уровень. Дети более остро реагируют на такие реакции. Если же пациенты не носят слуховые аппараты, то время сохранения повышенной слуховой чувствительности полностью зависит от адаптационных возможностей слуховой системы.

Для сохранения достигнутых улучшенных характеристик слуховой чувствительности пациентов после процедуры ЭМС необходимо уменьшать коэффициенты усиления слуховых аппаратов до приемлемого уровня, что не всегда можно сделать в короткие сроки. Рекомендовано использование режима так называемой акустической поддержки, т. е. подавать акустический сигнал на той частоте, на которой происходила электромагнитная стимуляция первого слухового нейрона, для чего можно использовать любой акустический источник с регулируемой частотой и громкостью сигнала. Кроме того, допустимо более частое использование самих процедур электромагнитной стимуляции слуха.

Заключение

Обнаружен эффект воздействия слабого переменного магнитного поля с величиной индукции менее 300 мкТл на первый слуховой нейрон, приводящий к восстановлению ПД на нем.

Показано, что при нейросенсорной тугоухости, вызванной отсутствием генерирования доста-

точного по величине потенциала действия на первом слуховом нейроне, слуховое восприятие может быть значительно улучшено (10–40 дБ) неинвазивным применением слабого (менее 300 мкТл) переменного МП. В зависимости от возраста пациентов процедура ЭМС может длиться от 10 до 20 минут. При этом используемое МП оказывает прямое воздействие на открытие потенциалзависимых ионных Na^+ и K^+ , а затем и Ca^{2+} каналов первого слухового нейрона. Один из возможных механизмов такого воздействия связан с поглощением энергии слабого переменного МП ядерными спинами протонов белковой структуры каналов, с дальнейшим преобразованием этой энергии в энергию орбитального движения электронной подсистемы за счет спин-орбитального взаимодействия. Изменения в электронной подсистеме приводят к структурным изменениям в спиральных структурах S4, ответственных за открытие потенциалзависимых ионных Na^+ , K^+ каналов. Происходит открывание этих каналов и катионы Na^+ , K^+ проникают внутрь нейрона, что в свою очередь вызывает открывание Ca^{2+} каналов и активное проникновение катионов Ca^{2+} внутрь первого слухового нейрона. Активация этого процесса вызывает деполяризацию его мембраны и генерирование ПД. В результате чего первый слуховой нейрон оказывается подготовленным к передаче электрических сигналов с волосковых рецепторов. Наблюдается значительное улучшение слухового восприятия пациента. Авторы предполагают продолжение работ в этом направлении как по линии расширения группы различных по возрасту пациентов, так и подбору эффективного режима акустической поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии потенциального или явного конфликта интересов.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest, either existing or potential.

Соответствие принципам этики

Все процедуры, выполненные в исследованиях с участием людей, соответствуют этическим стандартам Комитета по этике Санкт-Петербургского научно-исследовательского института уха, горла, носа и речи. От каждого из включенных в исследование участников было получено информированное добровольное согласие.

Ethics Approval

All procedures involving human participants were conducted in accordance with the ethical standards set by the Ethics Committee of St. Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech. Informed voluntary consent was obtained from each of the participants included in the study.

Вклад авторов

а. Щёголев Борис Фёдорович — создание аппаратуры для воздействия переменных магнитных полей, изложение теоретических основ действия переменных магнитных полей на биологические объекты, написание статьи;
б. Сурма Сергей Викторович — разработка и создание аппаратуры для воздействия низкочастотных магнитных полей, изложение результатов и проведение экспериментальных исследований;

в. Попова Ирина Ивановна — разработка методики и проведение экспериментальных исследований;

г. Клячко Дмитрий Семенович — разработка методики и проведение экспериментальных исследований.

Author Contributions

a. Boris F. Shchegolev — developed equipment for exposure to low-frequency magnetic fields, developed the theoretical basis for the action of alternating magnetic fields on biological systems, presented the results;

b. Sergey V. Surma — designed and developed equipment for exposure to low-frequency magnetic fields, presented the results, developed research methodology and conducted experiments;

c. Irina I. Popova — developed research methodology and conducted experiments;

d. Dmitry S. Klyachko — developed research methodology and conducted experiments.

Литература

- Альтман, Я. А., Таварткиладзе, Г. А. (2003) *Руководство по аудиологии*. М.: ДМК Пресс, 360 с.
- Бинги, В. Н. (1995) Ядерные спины в первичных механизмах биологического действия магнитных полей. *Биофизика*, т. 40, № 3, с. 671–685.
- Гайнутдинова, Т. Х., Силантьева, Д. И., Андрианов, В. В. и др. (2010) Влияние увеличения и снижения содержания внутриклеточного кальция на электрические характеристики командных нейронов у обученных улиток. *Ученые записки Казанского государственного университета. Серия: Естественные науки*, т. 152, № 2, с. 29–40.
- Мельников, К. Н. (2007) Кальциевые каналы возбудимых мембран. *Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии*, т. 5, № 1, с. 28–42.
- Преображенский, Б. С., Темкин, Я. С., Лихачев, А. Г. (1955) *Болезни уха, носа и горла*. 5-е изд. М.: Медгиз, 335 с.
- Преображенский, Н. А. (ред.). (1978) *Тугоухость*. М.: Медицина, 439 с.
- Сурма, С. В., Щёголев, Б. Ф., Скоромец, Т. А. (2018) *Способ купирования периферического нейрогенного хронического болевого синдрома*. Патент RU2645948C1. Дата регистрации 28.02.2018. Выдано Роспатентом.
- Тишевской, И. А. (2000) *Анатомия центральной нервной системы*. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 131 с.
- Ahmed, Z., Wieraszko, A. (2015) Pulsed magnetic stimulation modifies amplitude of action potentials *in vitro* via ionic channels-dependent mechanism. *Bioelectromagnetics*, vol. 36, no. 5, pp. 386–397. <https://doi.org/10.1002/bem.21917>
- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J. et al. (2002) *Molecular biology of the cell*. 4th ed. New York: Garland Science Publ., 712 p.
- Hoffman, D. A., Magee, J. C., Colbert, C. M., Johnston, D. (1997) K⁺ channel regulation of signal propagation in dendrites of hippocampal pyramidal neurons. *Nature*, vol. 387, no. 6636, pp. 869–875. <https://doi.org/10.1038/43119>
- Lacroix, J. J., Campos, F. V., Frezza, L., Bezanilla, F. (2013) Molecular bases for the asynchronous activation of sodium and potassium channels required for nerve impulse generation. *Neuron*, vol. 79, no. 4, pp. 651–657. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2013.05.036>
- Rosen, A. D. (2003) Effect of a 125mT static magnetic field on the kinetics of voltage activated Na⁺ channels in GH3 cells. *Bioelectromagnetics*, vol. 24, no. 7, pp. 517–523. <https://doi.org/10.1002/bem.10124>
- Shen, J.-F., Chao, Y.-L., Du, L. (2007) Effects of static magnetic fields on the voltage-gated potassium channel currents in trigeminal root ganglion neurons. *Neuroscience Letters*, vol. 415, no. 2, pp. 164–168. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2007.01.015>
- Zheng, Y., Dou, J.-R., Gao, Y. et al. (2016) Effects of 15 Hz square wave magnetic fields on the voltage-gated sodium and potassium channels in prefrontal cortex pyramidal neurons. *International Journal of Radiation Biology*, vol. 93, no. 4, pp. 449–455. <https://doi.org/10.1080/09553002.2016.1259671>

References

- Ahmed, Z., Wieraszko, A. (2015) Pulsed magnetic stimulation modifies amplitude of action potentials *in vitro* via ionic channels-dependent mechanism. *Bioelectromagnetics*, vol. 36, no. 5, pp. 386–397. <https://doi.org/10.1002/bem.21917> (In English)
- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J. et al. (2002) *Molecular biology of the cell*. 4th ed. New York: Garland Science Publ., 712 p. (In English)
- Altman, Ya. A., Tavartkiladze, G. A. (2003) *Rukovodstvo po audiologii [Handbook on audiology]*. Moscow: DMK Press, 360 p. (In Russian)
- Bingi, V. N. (1995) Yadernye spiny v pervichnykh mekhanizmax biologicheskogo dejstviya magnitnykh polej [Nuclear spins in the primary mechanisms of biological action of magnetic fields]. *Biofizika — Biophysics*, vol. 40, no. 3, pp. 671–685. (In Russian)
- Gainutdinova, T. Kh., Silantieva, D. I., Andrianov, V. V. et al. (2010) Vliyanie uvelicheniya i snizheniya sodержaniya vnutrikletochnogo kal'tsiya na elektricheskie kharakteristiki komandnykh nejronov u obuchennykh ulitok [Influence of intracellular calcium level increase and decrease on electrical characteristics of command neurons of learned snails]. *Uchenye zapiski Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*, vol. 152, no. 2, pp. 29–40. (In Russian)
- Hoffman, D. A., Magee, J. C., Colbert, C. M., Johnston, D. (1997) K⁺ channel regulation of signal propagation in dendrites of hippocampal pyramidal neurons. *Nature*, vol. 387, no. 6636, pp. 869–875. <https://doi.org/10.1038/43119> (In English)
- Lacroix, J. J., Campos, F. V., Frezza, L., Bezanilla, F. (2013) Molecular bases for the asynchronous activation of sodium and potassium channels required for nerve impulse generation. *Neuron*, vol. 79, no. 4, pp. 651–657. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2013.05.036> (In English)
- Mel'nikov, K. N. (2007) Kal'tsevye kanaly vozбудimykh membran [Calcium channels of excitable membranes]. *Obzory po klinicheskoy farmakologii i lekarstvennoj terapii — Reviews on Clinical Pharmacology and Drug Therapy*, vol. 5, no. 1, pp. 28–42. (In Russian)
- Preobrazhenskij, B. S., Temkin, Ya. S., Likhachev, A. G. (1955) *Bolezni ukha, nosa i gorla [Diseases of the ear, nose and throat]*. Moscow: Medgiz Publ., 335 p. (In Russian)
- Preobrazhenskij, N. A. (ed.). (1978) *Tugoukhost' [Hearing loss]*. Moscow: Meditsina Publ., 439 p. (In Russian)
- Rosen, A. D. (2003) Effect of a 125mT static magnetic field on the kinetics of voltage activated Na⁺ channels in GH3 cells. *Bioelectromagnetics*, vol. 24, no. 7, pp. 517–523. <https://doi.org/10.1002/bem.10124> (In English)
- Shen, J.-F., Chao, Y.-L., Du, L. (2007) Effects of static magnetic fields on the voltage-gated potassium channel currents in trigeminal root ganglion neurons. *Neuroscience Letters*, vol. 415, no. 2, pp. 164–168. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2007.01.015> (In English)
- Surma, S. V., Shchegolev, B. F., Skoromets, T. A. (2018) *Sposob kupirovaniya perifericheskogo nejrogennogo khronicheskogo bolevogo sindroma [Relief of peripheral neurogenic chronic pain syndrome]*. Patent RU2645948C1. Register date 28.02.2018. Granted by Rospatent. (In Russian)
- Tishevskoj, I. A. (2000) *Anatomia tsentral'noj nervnoj systemy [Central nervous system anatomy]*. Chelyabinsk: South Ural State University Publ., 131 p. (In Russian)
- Zheng, Y., Dou, J.-R., Gao, Y. et al. (2016) Effects of 15 Hz square wave magnetic fields on the voltage-gated sodium and potassium channels in prefrontal cortex pyramidal neurons. *International Journal of Radiation Biology*, vol. 93, no. 4, pp. 449–455. <https://doi.org/10.1080/09553002.2016.1259671> (In English)