

# **ИНФОРМАЦИОННЫЕ и РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**2023**

**Том 6**

**№ 4**

Журнал основан в 2018 г.  
Выходит 4 раза в год

## **Почетный главный редактор**

**Гуляев Юрий Васильевич** — научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, академик, член Президиума РАН (Москва, Россия)

## **Главный редактор**

**Вольвач Александр Евгеньевич** — доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе Крымской астрофизической обсерватория РАН (Крым, Россия)

## **Заместитель главного редактора**

**Ермолов Павел Петрович** — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Радиоэлектронные системы и технологии» Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем Севастопольского государственного университета (Севастополь, Россия)

## **Редакционная коллегия**

**Абрамов Игорь Иванович** — доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Физика приборов микро- и нанoeлектроники» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

**Афонин Игорь Леонидович** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиоэлектронные системы и технологии» Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем Севастопольского государственного университета (Севастополь, Россия)

**Белкин Михаил Евсеевич** — доктор технических наук, профессор, заведующий научно-технологической лабораторией и профессор МИРЭА — Российского технологического университета (Москва, Россия)

**Бичурин Мирза Имамович** — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой проектирования и технологии радиоэлектронной аппаратуры Новгородского государственного университета (Великий Новгород, Россия)

**Богатырёв Юрий Владимирович** — доктор технических наук, главный научный сотрудник Научно-практического центра НАН Беларуси по материаловедению (Минск, Беларусь)

**Борисова Нина Александровна** — доктор исторических наук, доцент, заместитель директора по науке и технике Центрального музея связи им. А. С. Попова, профессор кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского университета телекоммуникаций им. профессора М. А. Бонч-Бруевича (Санкт-Петербург, Россия)

**Громов Дмитрий Викторович** — доктор технических наук, профессор отделения нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике офиса образовательных программ, главный научный сотрудник центра экстремальной прикладной электроники института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Москва, Россия)

**Гудков Александр Григорьевич** — доктор технических наук, профессор кафедры «Технология приборостроения» МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, Россия)

**Запарий Владимир Васильевич** — доктор исторических наук, профессор Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина» (Екатеринбург, Россия)

**Запевалов Владимир Евгеньевич** — доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией гиротронов для управляемого термоядерного синтеза Института прикладной физики РАН (Нижний Новгород, Россия)

**Иванов Вячеслав Элизбарович** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий — РТФ Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина» (Екатеринбург, Россия)

**Ipev Dimov Stojce** — Professor at University of Johannesburg (South Africa)

**Ипатов Александр Васильевич** — доктор технических наук, профессор, научный руководитель Института прикладной астрономии РАН (Санкт-Петербург, Россия)

**Касьянов Александр Олегович** — доктор технических наук, профессор кафедры радиотехнических и телекоммуникационных систем Инженерно-технологической академии Южного федерального университета (Таганрог, Россия)

**Колосов Станислав Васильевич** — доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

**Криворучко Юрий Тимофеевич** — доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных систем Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации (Санкт-Петербург, Россия)

**Кураев Александр Александрович** — доктор физико-математических наук, профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

**Ларионов Михаил Григорьевич** — доктор физико-математических наук, заместитель руководителя Астрокосмического центра Физического института им. П. Н. Лебедева (Москва, Россия)

**Малютин Николай Дмитриевич** — доктор технических наук, профессор кафедры конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры, директор НИИ систем электрической связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Томск, Россия)

**Носков Владислав Яковлевич** — доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий — РТФ Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина» (Екатеринбург, Россия)

**Обухов Илья Андреевич** — доктор физико-математических наук, заместитель генерального директора по научной работе НПП «Радиотехника» (Москва, Россия)

**Овчинникова Елена Викторовна** — доктор технических наук, профессор кафедры 406 Национального исследовательского университета «Московский авиационный институт (Москва, Россия)

**Пестриков Виктор Михайлович** — доктор технических наук, профессор кафедры аудиовизуальных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения (Санкт-Петербург, Россия)

**Пестряков Александр Валентинович** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиооборудование и схемотехника», руководитель научно-исследовательского отдела «Радиотехнические системы и устройства» Московского технического университета связи и информатики (Москва, Россия)

**Совлуков Александр Сергеевич** — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (Москва, Россия)

**Старостенко Владимир Викторович** — доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики и электроники Физико-технического института Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского» (Симферополь, Россия)

**Широков Игорь Борисович** — доктор технических наук, профессор кафедры «Электронная техника» Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем Севастопольского государственного университета (Севастополь, Россия)

### **Международный редакционный совет**

**Богущ Вадим Анатольевич** — доктор физико-математических наук, профессор, ректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

**Евстигнеев Максим Павлович** — доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научной деятельности Севастопольского государственного университета (Севастополь, Россия)

**Nemai Chandra Karmakar** — associate professor at Department of Electrical and Computer Systems Engineering Monash University (Australia)

**Новиков Владимир Витальевич** — доктор технических наук, профессор кафедры ракетного вооружения надводных кораблей Черноморского высшего военно-морского ордена Красной Звезды училища им. П. С. Нахимова» (Севастополь, Россия)

## Содержание

### *Физические науки (1.3)*

**Вольвач А. Е., Коган Л. П., Вольвач Л. Н., Якубовская И. В.**

О предвестниках солнечных вспышек в сентябре 2017 года ..... 367

### *Электроника, фотоника, приборостроение и связь (2.2)*

**Андреев Ю. В.**

Моделирование энергетического приемника для систем сверхширокополосной хаотической радиосвязи ..... 374

**Малышев И. В., Паршина Н. В., Дубченко Н. И.**

Исследование проницаемости и преломления плоскополяризованной ЭМВ при взаимодействии с диэлектрической киральной средой ..... 386

**Каминская Т. П., Степович М. А., Шипко М. Н., Тихонов А. И., Попов В. В.**

Изучение влияния слабых импульсов магнитного поля на локальные свойства ленточных аморфных сплавов Fe(Ni, Cu)(SiB) ..... 398

### *История науки и техники (5.6.6)*

**Пестриков В. М.**

Научные открытия и изобретения Ли де Фореста, способствовавшие прогрессу в радиоламповых технологиях и развитии социума ..... 410

**Пестриков В. М.**

Коротковолновый успех арктической экспедиции Дональда Макмиллана ..... 440



# **INFOCOMMUNICATIONS and RADIO TECHNOLOGIES**

**2023**

**Vol. 6**

**No. 4**

The journal was founded in 2018  
Published 4 times a year

## Honorary Chief Editor

**Gulyaev Yury Vasilievich** – Scientific Director of the Institute of Radio Engineering and Electronics n. a. V. A. Kotelnikov RAS, academician, member of the Presidium of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

## Chief Editor

**Volvach Alexander Evgenievich** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Director for Research of the Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences (Crimea, Russia)

## Deputy Chief Editor

**Yermolov Pavel Petrovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department “Radioelectronic Systems and Technologies” of the Institute of Radioelectronics and Intellectual Technical Systems of Sevastopol State University (Sevastopol, Russia)

## Editorial Board

**Abramov Igor Ivanovich** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Head of the Research Laboratory “Physics of Micro- and Nanoelectronics Devices” of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

**Afonin Igor Leonidovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the “Radioelectronic Systems and Technologies” Department of the Institute of Radioelectronics and Intellectual Technical Systems of the Sevastopol State University (Sevastopol, Russia)

**Belkin Mikhail Evseevich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Scientific and Technological Laboratory and Professor of MIREA — Russian Technological University (Moscow, Russia)

**Bychurin Mirza Imamovich** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Design and Technology of Radio-Electronic Equipment of Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

**Bogatyryov Yury Vladimirovich** – Doctor of Technical Sciences, Chief researcher of the Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science (Minsk, Belarus)

**Borisova Nina Aleksandrovna** – Doctor of Historical Sciences, Associate Professor, Deputy director for science and technology of the Central Museum of Communications n. a. A. S. Popov, Professor of the department of information communication systems of the St. Petersburg University of Telecommunications n. a. Professor M. A. Bonch-Bruevich (St. Petersburg, Russia)

**Gromov Dmitry Viktorovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Nanotechnologies in Electronics, Spintronics and Photonics of the Office of Educational Programs, Chief Researcher of the Center for Extreme Applied Electronics Institute of Nanotechnologies in Electronics, Spintronics and Photonics of the National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow, Russia)

**Gudkov Aleksandr Grigoryevich** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department “Technology of Instrumentation” of Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

**Zapariy Vladimir Vasilievich** – Doctor of Historical Sciences, Professor of the Ural Federal University n. a. first President of Russia B. N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)

**Zapevalov Vladimir Evgenyevich** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory of Gyrotrons for Controlled Thermonuclear Fusion at the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (Nizhny Novgorod, Russia)



**Ivanov Vyacheslav Elizbarovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of the Institute of Radio Electronics and Information Technologies – RTF of Ural Federal University n. a. first President of Russia B. N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)

**Ilcev Dimov Stojce** — Professor at University of Johannesburg (South Africa)

**Ipatov Aleksandr Vasilievich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Supervisor of the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences (St. Petersburg, Russia)

**Kasyanov Aleksandr Olegovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio Engineering and Telecommunication Systems of the Engineering and Technology Academy of the Southern Federal University (Taganrog, Russia)

**Koloso Stanislav Vasilyevich** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Computing Methods and Programming of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

**Krivoruchko Yuri Timofeyevich** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio-Electronic Systems of the St. Petersburg State University of Civil Aviation (St. Petersburg, Russia)

**Kuraev Aleksandr Aleksandrovich** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Information Radio Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

**Larionov Mikhail Grigoryevich** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Head of the Astrocosmic Center of the Physical Institute n. a. P. N. Lebedev (Moscow, Russia)

**Malyutin Nikolai Dmitrievich** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Designing Components and Parts of Radioelectronic Equipment, Director of the Research Institute of Electrical Communication Systems at Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Tomsk, Russia)

**Noskov Vladislav Yakovlevich** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of the Institute of Radio Electronics and Information Technologies – RTF of Ural Federal University n. a. first President of Russia B. N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)

**Obukhov Ilya Andreevich** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy General Director for Research, Radiotekhnika Co. (Moscow, Russia)

**Ovchinnikova Elena Viktorovna** – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department 406 of the National Research University “Moscow Aviation Institute” (Moscow, Russia)

**Pestrikov Victor Mikhailovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Audiovisual Systems and Technologies of St. Petersburg State Institute of Film and Television (St. Petersburg, Russia)

**Pestryakov Alexander Valentinovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Radio Equipment and Circuitry, Head of the Research Department of Radio Engineering Systems and Devices of Moscow Technical University of Communications and Informatics (Moscow, Russia)

**Sovlukov Alexander Sergeevich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Institute of Control Problems n. a. V. A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

**Starostenko Vladimir Viktorovich** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Radiophysics and Electronics of the Physico-Technical Institute of Crimean Federal University n. a. V. I. Vernadsky (Simferopol, Russia)

**Shirokov Igor Borisovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electronic Engineering of the Institute of Radio Electronics and Intelligent Technical Systems, Sevastopol State University (Sevastopol, Russia)

### **International Editorial Council**

**Bogush Vadim Anatolyevich** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Rector of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

**Evstigneev Maksim Pavlovich** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research, Sevastopol State University (Sevastopol, Russia)

**Nemai Chandra Karmakar** – Associate Professor at Department of Electrical and Computer Systems Engineering Monash University (Australia)

**Novikov Vladimir Vitalievich** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Missile Weapons of Surface Ships of Black Sea Higher Naval School n. a. P. S. Nakhimov (Sevastopol, Russia)

---

#### **Address:**

Sevastopol State University  
33, Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russian Federation  
E-mail: [icrt.mail@mail.ru](mailto:icrt.mail@mail.ru)  
Website: <http://icrtjournal.com>

---

## Contents

### *Physical sciences*

|                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>A. E. Volvach, L. P. Kogan, L. N. Volvach, and I. V. Yakubovskaya,</b><br>On the Precursors of Solar Flares in September 2017 ..... | 367 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

### *Electronics, photonics, instrumentation and communications*

|                                                                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Yu. V. Andreyev,</b><br>Modeling an Energy Receiver<br>for Ultrawideband Chaotic Communications .....                                                                                                                | 374 |
| <b>I. V. Malyshev, N. V. Parshina, and N. I. Dubchenko,</b><br>Investigation of the Permeability and Refraction of a Plane-Polarized<br>EMW Interacting with a Dielectric Chiral Medium .....                           | 386 |
| <b>T. P. Kaminskaya, M. A. Stepovich, M. N. Shipko, A. I. Tikhonov, and V. V. Popov,</b><br>Studying the Influence of Weak Impulses Magnetic Field on Local Properties<br>Ribbon Amorphous Alloys Fe(Ni, Cu)(SiB) ..... | 398 |

### *History of science and technology*

|                                                                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>V. M. Pestrikov,</b><br>Scientific Discoveries and Inventions of Lee de Forest, which Contributed<br>to the Progress in Radio Tube Technology and Social Development ..... | 410 |
| <b>V. M. Pestrikov,</b><br>Shortwave Success of Donald Macmillan's Arctic Expedition .....                                                                                    | 440 |



УДК 523.9

## **О предвестниках солнечных вспышек в сентябре 2017 года**

<sup>1</sup> Вольвач А. Е., <sup>2</sup> Коган Л. П., <sup>1</sup> Вольвач Л. Н., <sup>1</sup> Якубовская И. В.

<sup>1</sup> Отдел радиоастрономии и геодинамики,  
Крымская астрофизическая обсерватория РАН,  
Ялта, 298688, Российская Федерация

<sup>2</sup> Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет  
ул. Ильинская, д. 65, г. Нижний Новгород, 603000, Российская Федерация  
volvach@bk.ru

Получено: 3 июля 2023 г.

Отрецензировано: 7 июля 2023 г.

Принято к публикации: 12 июля 2023 г.

**Аннотация:** Рассмотрена солнечная вспышка X9.3, произошедшая 6 сентября 2017 года. Изучение вариаций свойств мелкомасштабных флуктуаций плотности вероятности потоков солнечного рентгеновского излучения с космического аппарата GEOS позволило выделить набор повторяющихся перед всяпышкой событий. За 20—70 часов до вспышки предшествует серия от 1 до 8 предвестников.

**Ключевые слова:** Солнце, рентгеновское излучение, вспышки, предвестник.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** О предвестниках солнечных вспышек в сентябре 2017 года / А. Е. Вольвач и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 4. С. 367—373.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018):** О предвестниках солнечных вспышек в сентябре 2017 года / А. Е. Вольвач, Л. П. Коган, Л. Н. Вольвач и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. Т. 6, № 4. — С. 367—373.

### **1. Введение**

С двухленточной белой вспышки, которую зарисовал Кэррингтон 1 сентября 1859 года, начинается современная солнечно-земная физика. Последствия этой вспышки — полярные сияния на Кубе, выход из строя телеграфных аппаратов. Это была впервые документально зафиксированная техногенная катастрофа, вызванная вспышкой на Солнце.

С тех пор получено много подтверждений весьма существенного влияния Солнца на состояние межпланетной среды, околоземного космического пространства, атмосферы, биосферы и техносферы Земли.

Прогнозы солнечной активности разделяются по заблаговременности, т. е. по срокам, на которые дается прогноз. Каждый тип прогноза имеет свой набор прогнозируемых и исходных параметров. Обычно рассматриваются 4 типа прогнозов разной заблаговременности. Первый тип — диагностика: когда событие уже произошло и необходимо спрогнозировать последствия. Следующие 3 типа прогнозов и их заблаговременность: краткосрочный прогноз с заблаговременностью от нескольких часов до 3 дней; при среднесрочном прогнозе рассматривается время, соизмеримое с оборотом Солнца (27 дней) и долгосрочные прогнозы определяют характеристики 11-летнего солнечного цикла.

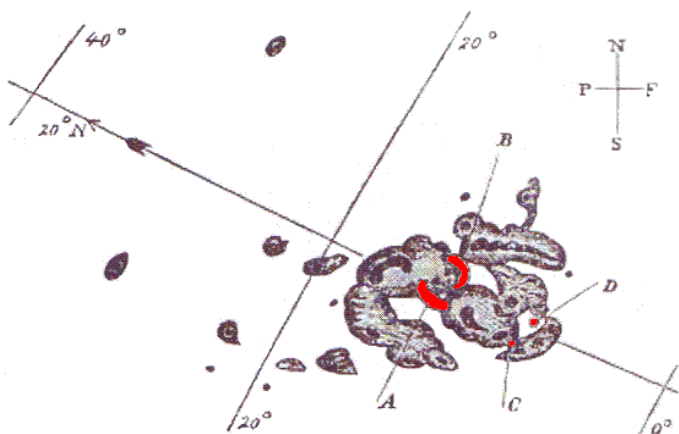


Рис. 1. Зарисовка Кэррингтона группы солнечных пятен со вспышкой в белом свете.

Узлы вспышки обозначены буквами А, В, С, D и окрашены красным.

Fig. 1. Carrington's sketch of a group of sunspots with a flash in white light.

Flash nodes are labeled A, B, C, D and colored red

Все типы прогнозов создаются на основе статистических исследований исходных параметров — отдельных характеристик солнечной активности, получаемых из регулярных наблюдений Солнца в разных спектральных диапазонах, от жесткого рентгена до длинноволнового радиоизлучения. Обычно для построения прогностического правила используется метод построения эпигноза. По многим наблюдениям, предшествующим реальным событиям (например, вспышкам), определяются каким-либо методом наиболее вероятные значения исходных параметров, за которыми последовала вспышка.

Задача получения физического прогноза событий солнечной активности занимала и занимает многих исследователей, но до сих пор не решена.

В этой статье с целью прогнозирования вспышек на Солнце используется подход, предложенный в [1—3] применительно к предсказанию приближающихся землетрясений. Далее рассматриваются свойства статистического функционала, введенного в указанных работах, применительно к измерениям интенсивности рентгеновского излучения Солнца, относящихся к периодам 15 августа — 6 сентября 2017 года. Данный промежуток включает как время подготовки, так и реализации вспышки большой интенсивности. Применяемая методика связана со статистическим эффектом уменьшения амплитуды мелкомасштабных вариаций плотности вероятности любого случайного процесса при появлении в его составе даже малого дополнительного слагаемого, которое можем считать независимым или слабо зависимым от фонового шума. Этот термин обозначает совокупность обычно наблюдаемых процессов (включая, в частности, шумы измерительной аппаратуры). Такие явления полагаем не связанными или слабо связанными с возмущениями, которые соответствуют процессам подготовки взрывов, далее происходящих в фотосфере Солнца.

## 2. Наблюдения и метод

Для анализа использовались данные солнечного рентгеновского излучения с космического аппарата *GEOS*. В 12:02UT 6 сентября 2017 года практически в центре солнечного диска в районе AR2673 была зафиксирована вспышка X9.3 (рис. 2). Вспышка сопровождалась ассиметричным полным ореолом коронального выброса массы, наблюдаемого в изображениях *SOHO/LASCO C2* в 06/1224 UTC. Мощной вспышке предшествовала более слабая (X2.2), которая произошла в той же области.

Как и в [1], в этом случае статистический функционал вида

$$L(n) = \frac{A}{M} \sum_{l=n-(M-1)}^n |\mathcal{L}_l|, \quad \mathcal{L}_l = \sum_{m=0}^{N-1} (-1)^m P_{m,l} \quad (1)$$

при  $A = 1000$  и  $M = 10$ . Любой множитель  $P_{m,l}$  (здесь  $l$  — номер отрезка реализации) есть вероятность попадания значений функции  $\sin[x(t)]$  (см. [1, 2]) в  $i$ -й интервал диапазона значений вида

$$\sin[x(t)]_{\min} + mh \leq \sin[x(t)] < \sin[x(t)]_{\min} + (m+1)h, \quad 0 \leq m \leq N-1. \quad (2)$$

В (2) интервал дискретизации  $h = 0.1$ , что соответствует в (1) и (2)  $N = 20$ . В качестве случайного процесса  $x(t)$ , во всех случаях рассматриваются измерения интенсивности рентгеновского излучения Солнца.

### 3. Обработка и результаты

Далее во всех случаях при проведении статистического анализа с помощью методики [1] рассматриваются данные измерений в рентгеновских диапазонах (a) 0.5—4 Å, см. рис. 3a) и (b) (1.0—8.0 Å, см. рис. 3b). На всех рисунках первая точка кривой  $L(n)$ , с учетом усреднения по первым 10 интервалам в 3000 секунд (см. (1)) соответствует моменту времени  $n = 500 \text{ min} \approx 8.33 \text{ h}$  от времени начала измерений. Определения локальных трендов (ЛТ) каналов, скользящих границ, дополнительных и направляющих точек в целом совпадают с [1].

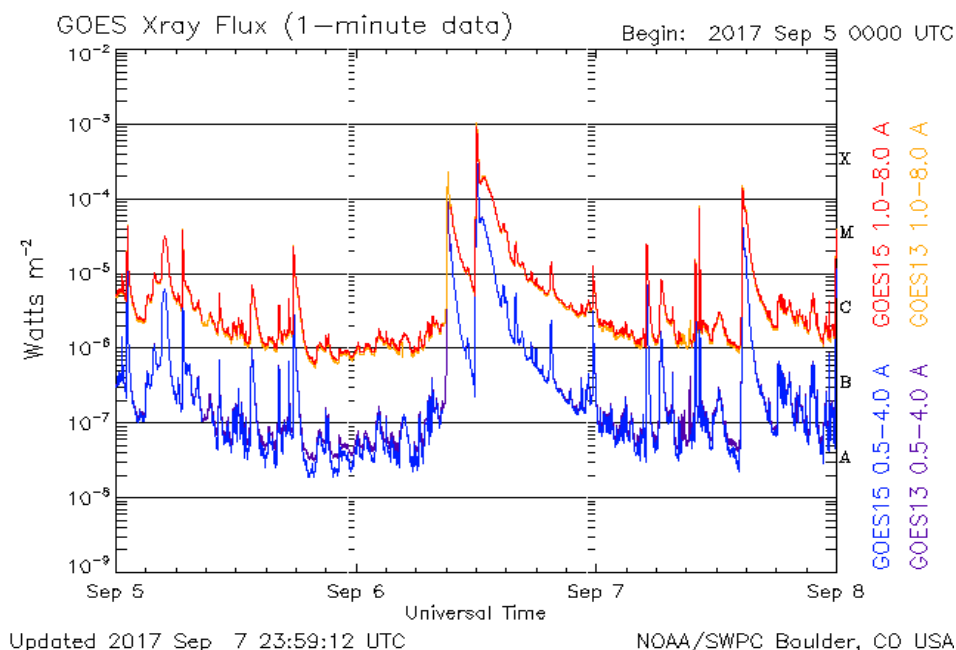


Рис. 2. Данные солнечного рентгеновского излучения GEOS с 5 по 7 сентября 2017 года.

Fig. 2. GEOS solar X-ray data from September 5 to 7, 2017

Полагаем, что определенные в [1] углы  $\Delta\alpha$  между границами каналов, коэффициенты отклонения  $\delta$  для дополнительных точек, минимально возможное удаление  $\Delta n$  по горизонтали от точки границы ЛТ до кривой  $L(n)$ , соотношение  $\zeta$  расстояний по оси абсцисс между тремя направляющими точками, отвечающими скользящей границе и максимальное отклонение  $\Delta s$  кривой  $L(n)$  от отрезка длиной  $\Delta l$ , соединяющего начальную и конечную точки любого ЛТ, удовлетворяют условиям  $\Delta\alpha \leq 1.4^\circ$ ,  $\delta \leq 1.2\%$ ,



$\Delta n \geq 12 h$ ,  $\zeta \leq 7/2$ ,  $\Delta s \leq 0.1 \Delta l$ . На всех рисунках дополнительные точки выделены сплошными, а критические точки (в которых имеет место одновременное тестирование кривой  $L(n)$  двух и более каналов и/или скользящих границ) — пунктирными эллипсами. Моменты фиксации предвестников обозначаются вертикальными пунктирами. При совпадении времени регистрации нескольких предвестников им сопоставляются на рисунках соответствующее число одинаковых по высоте и близко расположенных таких пунктирных линий. Любой интервал  $T_1, T_2, T_3 \dots$  обозначает время от регистрации предвестника до начала серии вспышек (Fig. 3).

На рис. 3а,б построена зависимость  $L(n)$  по измерениям за 00:00 15.08.2017 — 23:59 06.09.2017. (Исследуются вспышки класса X2.2, X9.3, M2.5, M1.4 и M1.2; моменты начала 06.09.2017 в 8.57, 11.53, 15.51, 19.21 и соответственно 23.33.) Для рис. 2а получаем  $T_1 = 279 h, T_2 = 222 h, T_3 = 126 h, T_4 = T_5 = 113 h, T_6 = T_7 = 54 h$  и  $T_8 = 37 h$ . Здесь  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_7$  и  $T_8$  соответствуют каналам 1–2, 3–4, 9–10, 5–6, 10–11 и 7–8, а промежутки  $T_4$  и  $T_5$  отвечают скользящим границам 4 и 9. Три из восьми моментов регистрации предвестников сосредоточены на промежутке длительностью 54 часа перед началом события. Для рис. 2б значения  $T_1 = 245 h, T_2 = 228 h, T_3 = 102 h, T_4 = 88 h, T_5 = 64 h, T_6 = 10 h, T_7 = 7 h$  и  $T_8 = 6 h$ . Интервалы  $T_1$  и  $T_2$  отвечают четвертому и пятому тестированиям для скользящей границы 1, промежутки  $T_3$  — четвертому тестированию для скользящей границы 3, тогда как  $T_4$ –7 и  $T_8$  соответствуют каналам 3–4, 7–8, 1–2, 9–10 и 5–6. Четыре из восьми моментов регистрации предвестников сосредоточены на промежутке длительностью 64 часа перед началом события.

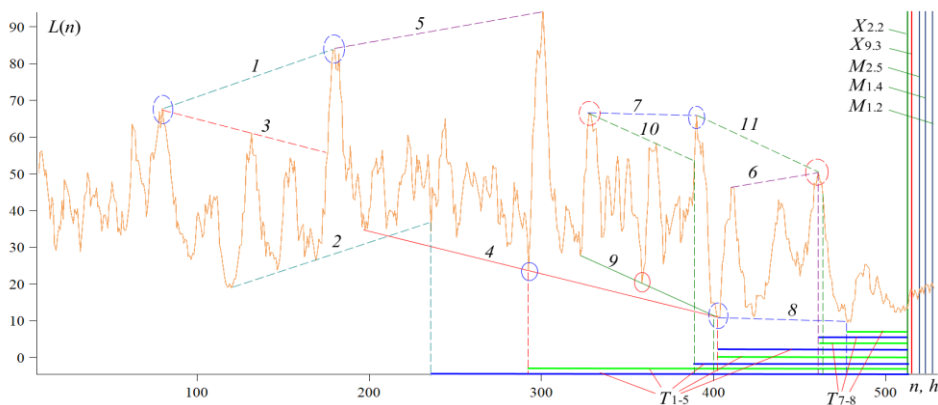


Рис. 3а. Серия вспышек 06.09.2017, диапазон (а).

Fig. 3a. Series of outbreaks 09/06/2017, range (a)

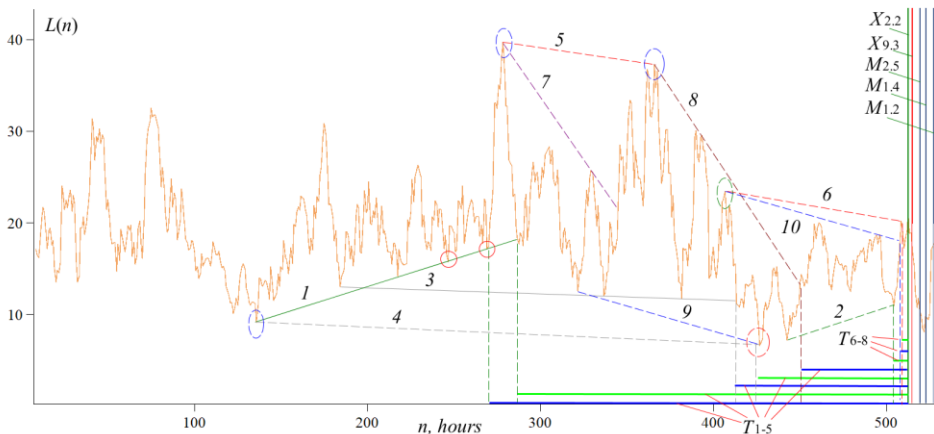


Рис. 3b. Серия вспышек 06.09.2017, диапазон (b).

Fig. 3b. A series of outbreaks on 09/06/2017, range (b)

#### 4. Выводы

С помощью предлагаемого применения для зависимости  $L(n)$  удалось выявить совокупность повторяющихся графических явлений, которые предшествуют солнечным вспышкам и поэтому могут быть интерпретированы как их предвестники. За 20—70 часов перед событием ему предшествует серия из трех и более предвестников.

#### Список литературы

1. Volvach A. E., Kogan L. P., Kanonidi K. H., et al. Changes in the properties of the statistics of physical and biophysical fields as earthquake precursor // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2022. T. 108. 106200.
2. Kogan L. P., Bubukin I. T., Shtenberg V. B. To the question of calculating the probability of strong earthquakes in real time // Chaos, Solitons and Fractals. 2021. T. 145. 110807.
3. Kogan L. P. Change in statistical functionals of critical frequency prior to strong earthquakes // Geomagnetism and Aeronomy. 2015. T. 55, № 4. С. 507—520.

#### Информация об авторах

**Вольвач Александр Евгеньевич**, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

**Коган Лев Петрович**, кандидат физико-математических наук, доцент, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород, Россия.

**Вольвач Лариса Николаевна**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

**Якубовская Инна Валерьевна**, младший научный сотрудник ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

# On the Precursors of Solar Flares in September 2017

A. E. Volvach<sup>1</sup>, L. P. Kogan<sup>2</sup>, L. N. Volvach<sup>1</sup>, and I. V. Yakubovskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Radio Astronomy and Geodynamics,  
Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences,  
Yalta, 298688, Russian Federation

<sup>2</sup>Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering  
65, Ilinskaya str., Nizhny Novgorod, 603000, Russian Federation  
volvach@bk.ru

Received: July 3, 2023  
Peer-reviewed: July 7, 2023  
Accepted: July 12, 2023

**Abstract:** The X9.3 solar flare that occurred on September 6, 2017 is considered. The study of variations in the properties of small-scale fluctuations in the probability density of solar X-ray fluxes from the GEOS spacecraft made it possible to identify a set of events that repeat before the flare. A series of 1 to 8 precursors precedes the outbreak 20–70 hours before.

**Keywords:** Sun, x-rays, flares, precursor.

**For citation (IEEE):** A. E. Volvach et al., “On the Precursors of Solar Flares in September 2017,” *Infocommunications and Radio Technologies*, 2023, vol. 6, no. 4, pp. 367–373, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.4.27. (In Russ.).

## References

- [1] A. E. Volvach, L. P. Kogan, K. H. Kanonidi, et al. “Changes in the properties of the statistics of physical and biophysical fields as earthquake precursor,” *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 108, 106200, 2022, doi: 10.1016/j.cnsns.2021.106200.
- [2] L. P. Kogan, I. T. Bubukin, and V. B. Shtenberg, “To the question of calculating the probability of strong earthquakes in real time,” *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 145, 110807, 2021, doi: 10.1016/j.chaos.2021.110807.
- [3] L. P. Kogan, “Change in statistical functionals of critical frequency prior to strong earthquakes,” *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 55, no. 4, pp. 507–520, 2015, doi: 10.1134/S0016793215040064.

## Information about the authors

**Alexandr E. Volvach**, Dr. Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea, Russian Federation.

**Lev P. Kogan**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia.

**Larisa N. Volvach**, PhD. Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea, Russian Federation.

**Yakubovskaya I. Valerevna**, junior researcher of the Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nauchni, Crimea, Russian Federation.

УДК 654.16; 621.391; 621.396; 519.21; 530.182

## Моделирование энергетического приемника для систем сверхширокополосной хаотической радиосвязи<sup>1</sup>

<sup>1,2</sup>Андреев Ю. В.

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН

г. Москва, ГСП-3, 125009, Российская Федерация

andreev.iuv@mipt.ru

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

г. Долгопрудный МО, 141700, Институтский пер., 9, Российская Федерация

Получено: 20 мая 2023 г.

Отрецензировано: 31 мая 2023 г.

Принято к публикации: 31 мая 2023 г.

**Аннотация:** Исследована проблема моделирования энергетического приема сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов для системы хаотической радиосвязи. Показано, что комбинация методов численного и аналитического моделирования полностью закрывает задачу расчета характеристик сверхширокополосных систем хаотической радиосвязи. С одной стороны, численный метод эффективен для расчета приемных систем с короткими радиоимпульсами, однако при увеличении длительности радиоимпульсов скорость метода пропорционально падает, в то время как технические требования к вычислительной аппаратуре пропорционально растут. С другой стороны, точность аналитического решения, недостаточная в случае коротких радиоимпульсов, пропорционально растет с увеличением длительности радиоимпульсов. Таким образом, в данной задаче численный и аналитический методы идеально дополняют друг друга. Показано, что точность приближенного аналитического решения для оптимального порога и вероятности ошибки приема становится достаточной для инженерных расчетов при значениях базы хаотических радиоимпульсов  $B \geq 200$ . Комбинация численного и аналитического методов моделирования позволяет существенно сократить длительность и трудоемкость расчетов хаотических систем связи, например, систем, обеспечивающих предельные дальности за счет увеличения базы сигнала (процессинга).

**Ключевые слова:** сверхширокополосные системы связи; энергетический детектор; динамический хаос; хаотический радиоимпульс; прямохаотические системы связи.

---

<sup>1</sup> Работа выполнена по Государственному заданию ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Андреев Ю. В. Моделирование энергетического приемника для систем сверхширокополосной хаотической радиосвязи // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 4. С. 374—385.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018):** Андреев, Ю. В. Моделирование энергетического приемника для систем сверхширокополосной хаотической радиосвязи / Ю. В. Андреев // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2023. — Т. 6, № 4. — С. 374—385.

## 1. Введение

Одной из интегральных характеристик системы связи является зависимость вероятности ошибки приема  $P$  от отношения сигнал/шум (на бит)  $E_b/N_0$  в точке приема. Вероятность ошибки определяется широким набором параметров, таких, как тип несущей, скорость передачи, способ и параметры модуляции и т. д., поэтому общее решение невозможно. В связи с этим расчеты вероятности ошибки приема от отношения сигнал/шум в многомерном пространстве параметров модуляции, как правило, выполняются путем численного моделирования, что является долгой и трудоемкой процедурой. Однако в некоторых конкретных случаях возможно точное или приближенное аналитическое решение для вероятности ошибки.

Прямые численные расчеты вероятности ошибки включают в себя моделирование прохождения радиоимпульсов через канал связи с шумом и детектирование их приемным устройством. Применительно к прямохаотическим системам связи [1, 2], при выбранном способе модуляции (амплитудная манипуляция, ортогональная система сигналов) и фиксированных параметрах хаотической несущей (частота  $F = (f_{lo}, f_{up})$ , ширина полосы  $\Delta F = f_{up} - f_{lo}$ ) вероятность ошибки  $P$  определяется длительностью хаотических радиоимпульсов  $T_p$  или такими связанными с ней параметрами, как скорость передачи  $R \sim 1/T_p$ , база сигнала  $B = 2T_p\Delta F$  и т. п.

Чтобы построить зависимость  $P(E_b/N_0)$ , процедура численного моделирования может выглядеть следующим образом. Для выбранного значения длительности радиоимпульса  $T_p$  и заданного отношения  $E_b/N_0$  необходимо сформировать  $N$  «хаотических» радиоимпульсов, с помощью генератора случайных чисел сформировать  $N$  «шумовых» радиоимпульсов, отфильтровать их в полосе частот хаотического сигнала, сложить их с учетом отношения сигнал/шум, вычислить энергию импульсов  $E_p$ , набрать статистику энергии радиоимпульсов, соответствующих передаче символов «0» и «1», выбрать оптимальный порог и вычислить вероятность ошибки  $P(E_b/N_0)$ . После этого необходимо задать новое значение отношения сигнал/шум  $E_b/N_0$  и повторить вычисления.

Чтобы набрать надежную статистику, для вероятности ошибки  $P$  необходимо произвести расчеты, как минимум, с  $N = (10\text{—}100) \times 1/P$  радиоимпульсами. Например, если требуется определить значения параметров системы, обеспечивающих прием сигнала с вероятностью ошибки  $P = 10^{-4}$ , необходимо промоделировать прием порядка  $N = 10^5\text{—}10^6$  радиоимпульсов. Заметим, что параметр моделирования  $N$  растет обратно пропорционально требуемой вероятности ошибки  $P$ . Соответственно растет и время моделирования.

Более того, при увеличении длительности радиоимпульсов  $T_p$  пропорционально растут и технические требования к вычислительным ресурсам, таким как объем оперативной памяти, что также уменьшает скорость вычислений. Поэтому практически время вычислений растет быстрее, чем  $T_p$ .

Для систем с короткими импульсами (с базой  $B \sim 10\text{—}100$ ) численное моделирование является достаточно эффективным и позволяет относительно быстро получать зависимости  $P(E_b/N_0)$ . Однако в СШП системах связи на хаотических радиоимпульсах (прямохаотических системах связи) база сигнала может достигать значений  $B = 200\text{—}1000$  и более. Особенно это касается систем, в которых ставится задача увеличения дальности связи за счет снижения скорости передачи и накопления сигнала соответственно, увеличения длительности радиоимпульса  $T_p$ , а значит и базы сигнала  $B = 2T_p\Delta F$ .

В связи с этим была поставлена задача создания аналитической модели некорреляционного приема СШП хаотических радиоимпульсов для СШП хаотических систем связи. Промежуточные результаты построения такой модели докладывались на «Крымико'2021» [3]. Подробный обзор моделей энергетических приемников и подходов к построению аналитических моделей энергетического приемника приводится в [4].

## 2. Аналитическая модель энергетического приемника

Общая схема энергетического приема приведена на рис. 1. Принятый сигнал после соответствующего полосового фильтра поступает на квадратичный детектор, а с него на интегратор. Связка этих двух устройств может быть реализована с помощью диода с квадратичной характеристикой и фильтра низких частот (дальнейшие результаты справедливы также и для логарифмического детектора). После интегратора сигнал пропорционален мгновенному значению мощности радиоимпульса на входе. В пороговом устройстве происходит выделение принятого символа, «0» или «1».

В данной модели делаются следующие разумные допущения: канал связи статический; шум в канале — аддитивный гауссовский; эффектами многолучевого распространения пренебрегаем.

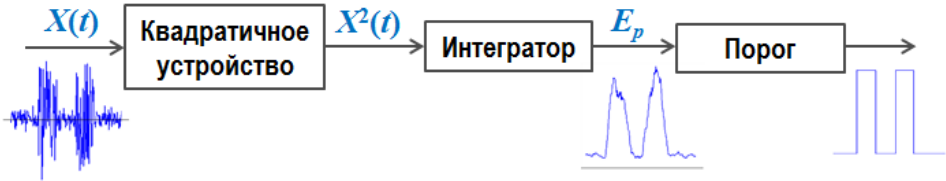


Рис. 1. Общая схема энергетического приемника.

Fig. 1. General scheme of the energy receiver

Рассмотрена ортогональная система сигналов, в которой символ «1» кодируется наличием СШП хаотического радиоимпульса на предписанной временной позиции, а символ «0» — отсутствием радиоимпульса на этой позиции. Считается, что символы передаются в среднем равновероятно, т. е.  $p(0) = p(1) = 1/2$ .

Обозначим радиочастотный сигнал на входе детектора  $X(t)$ . Требуется обнаружить радиоимпульс на известной временной позиции  $[0, T_p]$ , где  $T_p$  — длина радиоимпульса. Для этого необходимо различить два случая:

$$\begin{cases} X_1(t) = s(t) + \xi(t), & \text{символ «1»} \\ X_0(t) = \xi(t), & \text{символ «0»} \end{cases} \quad (1)$$

где  $s(t)$  — несущий хаотический сигнал,  $\xi(t)$  — шум канала. Полоса частот несущего сигнала и шума ограничена  $[f_{lo}, f_{up}]$ .

На выходе квадратичного устройства (рис. 1) получаем сигнал  $X^2(t)$ , а на выходе интегратора — сигнал, пропорциональный энергии радиоимпульса, т. е.  $E_1$  в случае символа «1» или  $E_0$  в случае символа «0». (Здесь и далее подстрочные знаки «1» и «0» в обозначениях переменных и функций относятся к случаям передачи символов «1» или «0».)

Раскроем выражение для энергии радиоимпульсов.

$$\begin{cases} E_1 = \int_0^T (s(t) + \xi(t))^2 dt = \int_0^T s^2(t) dt + \int_0^T \xi^2(t) dt + 2 \int_0^T s(t) \xi(t) dt \\ E_0 = \int_0^T (\xi(t))^2 dt = \int_0^T \xi^2(t) dt \end{cases} \quad (2)$$

Хаотический сигнал  $s(t)$  и гауссова помеха  $\xi(t)$  являются взаимно некоррелированными случайными (псевдослучайными) величинами с нулевым средним, поэтому кросскорреляционным членом в (2) можно пренебречь.

Для дальнейшего анализа удобно перейти от непрерывного представления сигналов к дискретному, т. е.

$$E_1 = \sum_{i=1}^n s_i^2 + \sum_{i=1}^n \xi_i^2, \quad (3)$$

$$E_0 = \sum_{i=1}^n \xi_i^2, \quad (4)$$

Здесь  $s_i$  и  $\xi_i$  — независимые отсчеты на интервале  $[0, T_p]$ . Согласно теореме Котельникова отсчеты берутся через интервалы времени  $\Delta t = 1/2\Delta F = \frac{1}{2(f_{up}-f_{lo})}$ . Число таких отсчетов (степеней свободы сигнала) равно  $n = \frac{T_p}{\Delta t} = 2T_p\Delta F = B$ , где  $B$  — база сигнала.

Энергия  $E_0$  в выражении (4) есть сумма квадратов отсчетов случайной помехи. Поскольку шум на входе детектора считаем гауссовым, независимые отсчеты шума можно описать нормальным распределением  $N(0, \sigma_{noise}^2)$ . Соответственно, сумма квадратов таких отсчетов описывается распределением хи-квадрат с  $n$  степенями свободы с моментами  $E[\chi] = n\sigma_{noise}^2$ ,  $D[\chi] = 2n\sigma_{noise}^2$ , которое при больших  $n$  можно приближенно описать [5] нормальным распределением  $N(n\sigma_{noise}^2, 2n\sigma_{noise}^4)$ . В практических приложениях прямохаотической связи условие  $n \gg 1$  уверенно выполняется [1, 2], поэтому  $E_0$  можно с хорошей точностью аппроксимировать выражением

$$E_0 = \sum_{i=1}^n \xi_i^2 = n\sigma_{noise}^2 + \zeta_{noise}, \quad (5)$$

где  $\zeta_{noise}$  — случайная величина, описываемая нормальным распределением  $N(0, 2n\sigma_{noise}^4)$ .

Аналогично рассмотрим оценку энергии на позиции радиоимпульса  $E_1$ . Заметим, что она фактически не содержит информации о характере носителя информации (хаотический, регулярный, тип модуляции и т. д.). Однако природа носителя проявляется в статистике значений  $E_1$ .

При достаточно широкой полосе  $[f_{lo}, f_{up}]$  дискретные выборки амплитудного хаотического сигнала  $s_i$  с плоской спектральной характеристикой, взятые с тем же шагом  $\Delta t$ , с хорошей точностью могут быть описаны нормальным распределением с нулевым средним и дисперсией  $D = \sigma_{chaos}^2$ .

Тогда в выражении (3) для  $E_1$ , значения энергии радиоимпульса  $\sum s_i^2$  тоже описываются распределением хи-квадрат, которое так же, как в выражении для  $E_0$ , можно аппроксимировать нормальным распределением. В этом случае,

$$E_1 = \sum_{i=1}^n s_i^2 + \sum_{i=1}^n \xi_i^2 = n(\sigma_x^2 + \sigma_{ш}^2) + \zeta_x + \zeta_{ш} = \zeta_{\Sigma}, \quad (6)$$

где  $\zeta_{\Sigma}$  — отсчеты с нормальным распределением  $N(n(\sigma_{chaos}^2 + \sigma_{noise}^2), 2n(\sigma_{chaos}^2 + \sigma_{noise}^2)^2)$ .



Для удобства введем параметр  $\gamma = \frac{\sigma_{chaos}^2}{\sigma_{noise}^2}$ , тогда выражение для распределения выглядит немного проще  $N(n\sigma_{noise}^2(1+\gamma), 2n\sigma_{noise}^4(1+\gamma)^2)$ .

Таким образом, распределения отсчетов энергии аппроксимированы в модели следующими функциями:

$$w_0(x) = \frac{1}{\sigma_{noise}^2 \sqrt{4\pi n}} e^{-\frac{(x-\langle E_0 \rangle)^2}{4n\sigma_{noise}^4}} \quad (7)$$

$$w_1(x) = \frac{1}{(1+\gamma)\sigma_{noise}^2 \sqrt{4\pi n}} e^{-\frac{(x-\langle E_1 \rangle)^2}{4n\sigma_{noise}^4(1+\gamma)^2}} \quad (8)$$

где  $\langle E_0 \rangle = n\sigma_{noise}^2$  и  $\langle E_1 \rangle = \langle E_0 \rangle(1+\gamma)$  являются средними значениями энергии принятого сигнала на интервале  $[0, T_p]$  соответственно при отсутствии и наличии радиоимпульса (см. рис. 2).

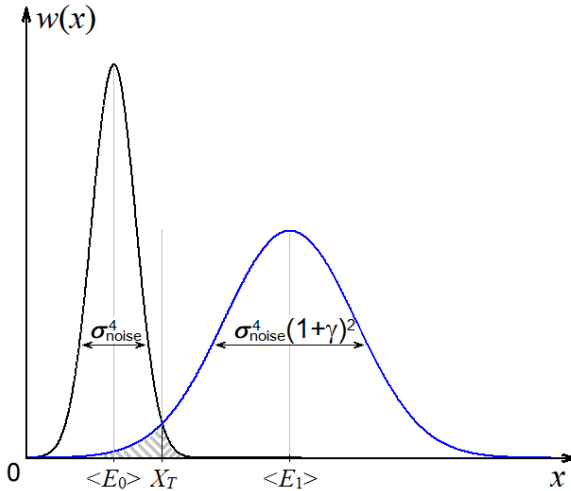


Рис. 2. Функции распределения энергии для символов «0» и «1».

Fig. 2. Energy distribution functions for the symbols “0” and “1”

Чтобы различить принятые символы, введем порог по энергии  $X_T$ . Если энергия импульса ниже порога, т. е.  $E_p < X_T$ , считаем, что принят символ «0»; в противном случае символ «1».

Вероятность ошибки  $P_{err}$  складывается из вероятностей ложного обнаружения для каждого из символов (соответствует заштрихованной области на рисунке 2). С учетом вероятности передачи символов  $p(0) = p(1) = 1/2$  получаем

$$P_{err} = P_{err,0} + P_{err,1} = \frac{1}{2} \int_{X_T}^{\infty} w_0(x) dx + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{X_T} w_1(x) dx, \quad (9)$$

Оптимальный порог получаем путем минимизации функционала  $P_{err}(x)$ . Нетрудно показать, что минимум достигается при пороге  $X_T$ , заданном уравнением

$$w_1(X_T) = w_0(X_T), \quad (10)$$

Введем новую переменную  $y = x/\langle E_0 \rangle = x/(n\sigma_{noise}^2)$  и решим уравнение (10). После преобразований получаем квадратное уравнение

$$y^2 - 2\frac{1+\gamma}{2+\gamma}y - \frac{4}{n} \frac{(1+\gamma)^2}{((1+\gamma)^2-1)} \ln \ln(1+\gamma) = 0, \quad (11)$$

которое имеет два действительных корня: один отрицательный (его отбрасываем), а второй положительный, который и дает явное выражение для оптимального порога:

$$\frac{X_T}{\langle E_0 \rangle} = \frac{1+\gamma}{2+\gamma} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4}{B} \frac{2+\gamma}{\gamma} \ln((1+\gamma))} \right). \quad (12)$$

В выражении (12) параметр  $B = 2T_p\Delta F$  — база (или процессинг, или число степеней свободы) сигнала, а  $\gamma = \frac{\sigma_{chaos}^2}{\sigma_{noise}^2}$  — параметр, который можно рассматривать как своего рода отношение сигнал/шум (SNR) на входе приемника. На самом деле,  $SNR = \frac{P_{chaos}}{P_{noise}} = \frac{\gamma}{2}$  (при  $p(0) = p(1) = 1/2$ ), поскольку средняя мощность сигнала  $P_{chaos}$  равна половине мощности импульса (так как на позициях нулевых символов мощность полезного сигнала равна нулю).

Зная оптимальный порог, вводя выражение  $Y_T = X_T/\langle E_0 \rangle$  и используя симметрию  $w_1(x)$ , получаем следующее аналитическое решение для вероятности ошибки приема сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов с большой базой ( $B \gg 1$ ):

$$P_{err} = \frac{1}{2} Q\left(\sqrt{\frac{B}{2}}(Y_T-1)\right) + \frac{1}{2} Q\left(\sqrt{\frac{B}{2}}\left(1-\frac{Y_T}{1+\gamma}\right)\right), \quad (13)$$

где  $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$  — дополнительная кумулятивная функция нормального распределения;  $B$  — база сигнала;  $Y_T$  — порог, нормированный на среднюю энергию шума  $\langle E_0 \rangle$ ; параметр  $\gamma = 2 \cdot SNR$ .

### 3. Соотношение аналитических и расчетных моделей приема

Сравним аналитические оценки (13) с результатами численного моделирования. На рисунке 3 численные оценки вероятности показаны мар-

керами, а аналитические оценки — непрерывными кривыми. Чтобы получить численные оценки для заданного значения отношения сигнал/шум на бит ( $E_b/N_0$ ), набиралась статистика  $E_0$  и  $E_1$  на  $10^6$ — $10^7$  хаотических радиоимпульсах с базой  $B$ , затем оценивалась площадь под перекрывающимися «хвостами» распределений (заштрихованные области на рисунке 2), значение этой площади фактически и представляет собой вероятность ошибки приема. Чтобы перейти от отношения сигнал/шум на точку (SNR) к более привычной для импульсных сигналов форме  $E_b/N_0$ , выполним следующие простые преобразования:

$$SNR = \frac{\langle P_{chaos} \rangle}{\langle P_{noise} \rangle} = \frac{E_b}{T_p} \cdot \frac{1}{N_0 \Delta F} = \left( \frac{E_b}{N_0} \right) \cdot \frac{2}{2T_p \Delta F} = \left( \frac{E_b}{N_0} \right) \cdot \frac{2}{B}, \quad (14)$$

где  $E_b$  — средняя энергия бита;  $T_p$  — длительность радиоимпульса;  $N_0$  — спектральная плотность шума;  $\Delta F$  — ширина полосы СШП сигнала;  $B = 2\Delta F T_p$  — база сигнала. Итак,

$$\frac{E_b}{N_0} = SNR \cdot \frac{B}{2}. \quad (15)$$

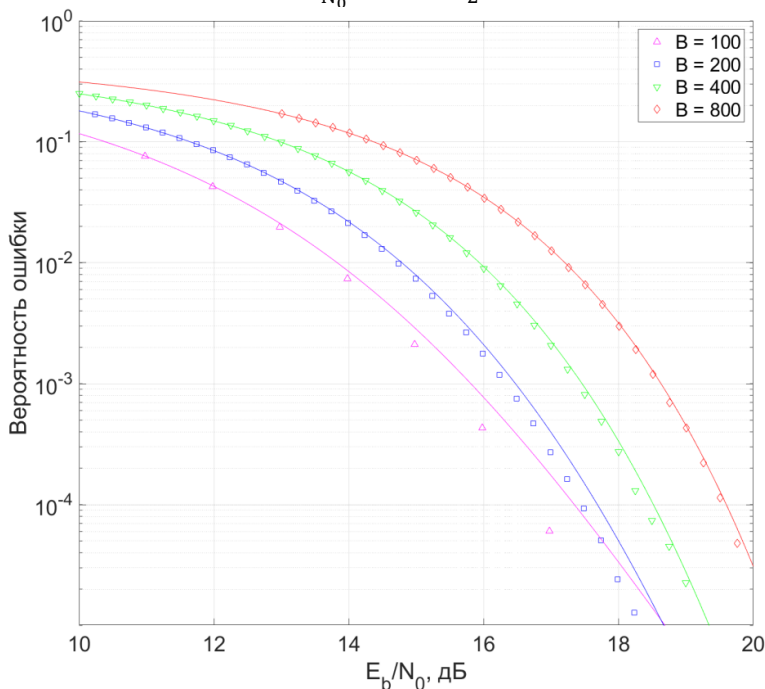


Рис. 3. Зависимость вероятности ошибки приема  $Perr$  от  $E_b/N_0$  и базы сигнала  $B$ .

Fig. 3. Reception error probability  $Perr$  as a function of  $E_b/N_0$  and signal base  $B$

Как можно видеть на рисунке 3, при малых значениях базы сигнала  $B$  аналитические и численные оценки с увеличением  $E_b/N_0$  расходятся, что означает, что при малых значениях базы  $B$  приближенные аналитические оценки (13) не очень точны.

Однако с ростом базы  $B$  расхождение уменьшается и становится незначительным. Расхождение аналитических и численных оценок объясняется аппроксимацией распределения хи-квадрат нормальным распределением, а точность аппроксимации возрастает при  $B = n \rightarrow \infty$ . Как видно из рисунка 3, если для  $B = 100$  при  $P_{err} = 10^{-4}$  разница в значениях  $E_b/N_0$  между расчетным и аналитическим графиками составляет около 0,6 дБ, то для  $B = 200$  она становится уже меньше 0,2 дБ, что является вполне приемлемой точностью при разработке практических систем.

Таким образом, для  $B \geq 200$  представленная модель энергетического приема позволяет оценить вероятность ошибки с точностью, достаточной для инженерных расчетов.

#### 4. Заключение

В докладе представлена аналитическая модель энергетического приема сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов и проведено сравнение приближенных аналитических оценок с результатами численного моделирования.

Трудоемкость расчета характеристик приема СШП хаотических радиоимпульсов путем численного моделирования растет, по меньшей мере, пропорционально базе сигнала; как следствие, расчет систем хаотической связи с большой базой предъявляет высокие требования к вычислительному устройству. Поэтому такие расчеты можно заменить вычислениями по аналитическим формулам, тем более, что их точность с увеличением базы сигнала только увеличивается. А в области малых баз, там, где приближенные аналитические оценки становятся неточны, достаточно эффективно можно использовать численное моделирование. Показано, что для инженерных расчетов граница применимости численной и аналитической моделей может быть выражена как  $B = 200$ .

Областью применения предлагаемой аналитической модели являются, прежде всего, системы сверхширокополосной связи, основанные на хаотических радиоимпульсах, например, системы связи, обеспечивающие предельные дальности за счет увеличения базы сигнала (процессинга).

Комбинация предложенной аналитической модели и численного моделирования «закрывает» проблему расчета характеристик СШП хаотических систем связи.

### Список литературы

1. Дмитриев А. С. Динамический хаос как носитель информации. В кн. : Новое в синергетике : Взгляд в третье тысячелетие / М. : Наука, 2002. С. 82—122.
2. Dmitriev A. S., Kyarginsky B. E., Panas A. I., Starkov S. O. Experiments on ultra wideband direct chaotic information transmission in microwave band // Int. J. Bifurcation and Chaos. 2003. Vol. 13, no. 6. P. 1495—1507.
3. Андреев Ю. В. Прием сверхширокополосных хаотических радиопульсов с большой базой // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2021. № 3. С. 81—82.
4. Andreyev Yu. Analytical Model of an Energy Detector for Ultra-Wideband Chaotic Communications // Electronics. 2023. Vol. 12, no. 4. P. 954.
5. Montgomery D. C., Runger G. C. Applied Statistics and Probability for Engineers. 6<sup>th</sup> ed. Wiley, 2014. 836 p.

### Информация об авторе

**Андреев Юрий Вениаминович**, старший научный сотрудник ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, главный научный сотрудник МФТИ, г. Москва, Российская Федерация.

# Modeling an Energy Receiver for Ultrawideband Chaotic Communications

Yu. V. Andreyev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS  
Moscow, GSP-3, 125009, Russian Federation  
andreev.iuv@mipt.ru*

<sup>2</sup> *Moscow Institute of Physics and Technology  
Dolgoprudny Moscow Region, 141700, Institutskiy per., 9, Russian Federation*

Received: May 20, 2023

Peer-reviewed: May 20, 2023

Accepted: June 3, 2023

**Abstract:** The problem of modeling an energy receiver of ultra-wideband chaotic radio pulses for chaotic radio communications is studied. As is shown, a combination of numerical and analytical modeling completes the problem of calculating characteristics of ultra-wideband chaotic communication systems. On the one hand, the numerical method is effective for calculating receiving systems with short radio pulses, and with an increase in the duration of radio pulses  $T_p$  the rate of the method decreases proportionally, whereas technical requirements for the computing equipment increase proportionally, so the operation time increases faster than  $T_p$ . On the other hand, the accuracy of the analytical solution, which is insufficient in the case of short radio pulses, grows proportionally with an increase in the duration of the radio pulses. Thus, in this problem, the numerical and analytical methods ideally complement each other. It is shown that the accuracy of the approximate analytical solution for the optimal threshold and the error probability becomes sufficient for engineering calculations at the values of the number of freedom degrees (processing gain) of chaotic radio pulses  $B \geq 200$ . The combination of numerical and analytical modeling methods can significantly simplify tiresome modelling of chaotic communication systems, for example, those that provide maximum range by increasing the signal length.

**Keywords:** ultrawideband communications; energy detector; chaotic radio pulse; direct chaotic communications; envelope detector; logarithmic detector.

**For citation (IEEE):** Yu. V. Andreyev, “Modeling an Energy Receiver for Ultrawideband Chaotic Communications,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 4, pp. 374–385, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.4.28. (In Russ.).

## References

- [1] A. S. Dmitriev, “Dynamic chaos as a carrier of information,” In : *New in synergetics : A look into the third millennium*, Moscow : Nauka, 2002, pp. 82–122. (In Russ.).

- [2] A. S. Dmitriev, B. Ye. Kyarginsky, A. I. Panas, and S. O. Starkov, "Experiments on Direct Chaotic Communications in Microwave Band," *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 13, no. 06, pp. 1495–1507, Jun. 2003, doi: 10.1142/s0218127403007345.
- [3] Yu. V. Andreyev, "Reception of ultra-wideband chaotic radio pulses with a large base," *Microwave and telecommunication technology*, no. 3, pp. 81–82, 2021. (In Russ.).
- [4] Yu. V. Andreyev, "Analytical Model of an Energy Detector for Ultra-Wideband Chaotic Communications," *Electronics*, vol. 12, no 4, p. 954, 2023, doi: 10.3390/electronics12040954.
- [5] D. C. Montgomery and G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 6<sup>th</sup> ed., Wiley, 2014.

### Information about the author

**Yuri V. Andreyev**, Senior Researcher of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Chief Researcher of MIPT, Moscow, Russian Federation.

## Исследование проницаемости и преломления плоскополяризованной ЭМВ при взаимодействии с диэлектрической киральной средой

Малышев И. В., Паршина Н. В., Дубченко Н. И.

Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения

Южного федерального университета

ул. Шевченко, 2, г. Таганрог Ростовской области, 347922, Российская Федерация

ivmalyшев@sfedu.ru

Получено: 20 мая 2023 г.

Отрецензировано: 31 мая 2023 г.

Принято к публикации: 31 мая 2023 г.

**Аннотация:** На основе рассмотрений известных соотношений Максвелла и Максвелла — Гарнетта для диэлектрических подложек, представленных в виде объемного диэлектрика (сплава) с распределенными в нем кирально-связанными объемными структурами (например, лево- и правозакрученными спиральями), предложены два алгоритма определения основных связанных друг с другом параметров: коэффициента киральности, концентрации киральных частиц и диэлектрических проницаемостей. Первая часть работы имеет теоретический характер и ориентирована относительно микроволнового частотного диапазона. Во второй части работы приводится способ нахождения коэффициента преломления Е-плоскополяризованной ЭМВ при ее прохождении через киральную среду. При этом используется оригинальный метод, основанный на связи коэффициента киральности с углом поворота волны, прошедшей через данную среду с заданными электрофизическими параметрами.

**Ключевые слова:** диэлектрические подложки, кирально-связанные структуры, коэффициент киральности, коэффициенты отражения и преломления, уравнения Максвелла — Гарнетта, рупорная антенна, круговая поляризация.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Малышев И. В., Паршина Н. В., Дубченко Н. И. Исследование проницаемости и преломления плоскополяризованной ЭМВ при взаимодействии с диэлектрической киральной средой // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 4. С. 386—397.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018):** Малышев, И. В. Исследование проницаемости и преломления плоскополяризованной ЭМВ при взаимодействии с диэлектрической киральной средой / И. В. Малышев, Н. В. Паршина, Н. И. Дубченко // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2023. — Т. 6, № 4. — С. 386—397.



## 1. Введение

Как известно [1], искусственные киральные метаматериалы могут представлять собой диэлектрические подложки, которые содержат распределенные в них различные элементы или включения, имеющие симметричное расположение относительно друг друга и которые равномерно распределены в твердых сплавах диэлектрической среды.

При этом уравнения Максвелла для такой изотропной пастеровской среды включают в себя киральнозависимые поправки [1]:

$$\begin{aligned}\bar{D} &= \varepsilon \bar{E} - j\chi\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}\bar{H}, \\ \bar{B} &= \mu\bar{H} + j\chi\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}\bar{E},\end{aligned}\quad (1)$$

в которых использованы обозначения:  $\bar{H}$  и  $\bar{E}$  — напряженности магнитного и электрического и магнитного полей;  $\chi$  — безразмерный коэффициент киральности ( $\chi \leq n_0\sqrt{\frac{\mu_0}{\mu_0\varepsilon_0}}$ , где  $n_0$  — коэффициент отражения диэлектрической среды с параметрами:  $\varepsilon$ ,  $\mu$  — диэлектрическая и магнитная проницаемости среды;  $\varepsilon_0$ ,  $\mu_0$  — эти же параметры для вакуума).

Основные параметры спирали — ее площадь  $S$  и длина  $l$ , которая определяется из условия  $l \ll \lambda$ , а также диаметр проволоки  $D = 2r$ .

В дальнейшем будут определены два алгоритма нахождения коэффициента киральности и электрофизических параметров спиралевидных включений, которые находятся в объеме контейнера подложки, а также определяющегося из этого соотношения для коэффициента преломления ЭМВ в такой среде.

## 2. Расчет связанных параметров киральных сред

Вначале определим значение активных и реактивных параметров спирали, которые должны определять основные киральные свойства такой среды.

Известно, что подобные спирали обладают поляризационными моментами  $p_e$  и  $p_m$  определяемыми вдоль единичных векторов  $u$  в виде плоскостных параметров объема указанной среды [2]:

$$\begin{aligned}p_e &= \alpha_{ee}uuE + \alpha_{em}uuH, \\ p_m &= \alpha_{mm}uuH + \alpha_{me}uuE.\end{aligned}\quad (2)$$

Для идеального проводника материала провода:

$$\alpha_{ee} = \frac{Cl^2}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC}, \quad (3)$$

$$\alpha_{mm} = \frac{\mu^2 \omega^2 CS^2}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC} \quad (4)$$

$$\alpha_{em} = -\alpha_{me} = \frac{j\omega \mu CS l}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC}. \quad (5)$$

В этих соотношениях поляризуемость  $\alpha_{ij}$  спирали, определяющая киральные свойства среды с фоновой проницаемостью  $\mu$ , выражена через распределенные параметры: емкость  $C$  и индуктивность  $L$  проволоки, а также собственного сопротивления  $R$  [3].

Конфигуративный эскиз металлической спирали, которая наиболее часто исследовалась и использовалась применительно к метаматериалам в составе киральной среды подложки, приведен на Рис. 1. В этой среде будем полагать равное количество однородно распределенных право- и левовинтовых спиралей (ПС и ЛС), которые в [2, 4, 5] упоминаются как модифицированные элементы Телегена. На этом эскизе указаны следующие параметры:  $r$  и  $l$  — радиус и длина проволоки спирали,  $N = N_c$  — число витков спирали,  $R = R_c$  — радиус одного витка и  $h$  — межвитковое расстояние.

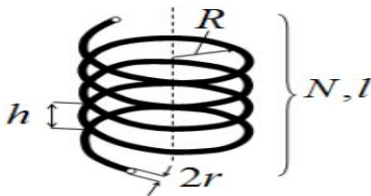


Рис. 1. Эскиз спирали модифицированного элемента Телегена.

Fig. 1. Design of the spiral of the modified Tellegen element

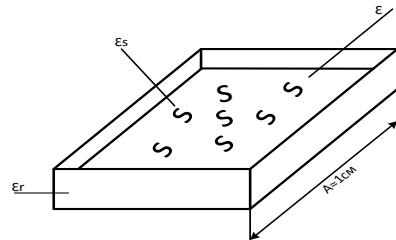


Рис. 2. Контейнер с диэлектриком и распределенными в нем ПС и ЛС.

Fig. 2. A container with a dielectric and distributed in it right- and left-handed spirals

Вследствие дисперсионности свойств такой среды (Рис. 2) можно определить зависимость коэффициента киральности такого образца от следующих параметров: концентрация  $N$  ЛС и ПС, частота  $f$ , диэлектрические проницаемости как материала контейнера ( $\epsilon_r$ ), в котором находятся спирали ( $\epsilon_s$ ), так и самой среды ( $\epsilon$ ) [5, 6].

Определение  $R$ ,  $L$ ,  $C$  — параметров для спирали с размерами  $l$  и  $S$ , входящих в соотношения (2—4), даст возможность, задавая параметры поляризуемости спирали  $\alpha_{ij}$ , в конечном счете учесть эти зависимости в

соотношениях, описывающих излучательные и поглощающие свойства метаматериалов относительно взаимодействующей с ними ЭМВ.

Используя подстановку:  $x + jy = (1 - \omega^2 LC) + j\omega RC$ , эти соотношения запишутся в виде:

$$\frac{x + jy}{C} = \frac{l^2}{\alpha_{ee}}, \quad (6)$$

$$\frac{x + jy}{C} = \frac{S^2 \mu^2 \omega^2}{\alpha_{mm}}, \quad (7)$$

$$\frac{x + jy}{C} = j \frac{\mu \omega S}{\alpha_{em}}. \quad (8)$$

Из (6) и (7) следует, что:

$$\frac{l^2}{\alpha_{ee}} = \frac{S^2 \mu^2 \omega^2}{\alpha_{mm}}. \quad (9)$$

А из (9) и (8) получим:

$$\frac{l}{\alpha_{ee}} = j \frac{\mu \omega S}{\alpha_{em}}. \quad (10)$$

Из (9) следует:

$$\frac{l}{S} = \mu \omega \sqrt{\alpha_{ee} / \alpha_{mm}}. \quad (11)$$

Значение  $R$  определяется через величину  $\rho$  (удельное сопротивление материала спирали) как  $R = \rho l / S$ . Остальные электрические параметры структуры спирали ( $L$ ,  $C$ ) могут быть найдены из соотношений (6—8) [5]. Уравнение (11) после соответствующей подстановки даст:

$$R = \rho \mu \omega \sqrt{\alpha_{ee} / \alpha_{mm}}. \quad (12)$$

Из соотношения (6) и (7) следует

$$C = \frac{\alpha_{ee}}{l^2 + \omega^2 L \alpha_{ee} + j \omega R \alpha_{ee}}, \quad (13)$$

$$L = \frac{\alpha_{mm} - C(\mu^2 \omega^2 S^2 + j \omega R \alpha_{mm})}{\omega^2 C \alpha_{mm}}. \quad (14)$$

Полученные равенства (12—14) являются исходными для определения электрофизических параметров ЛС и ПС, которые распределены в объеме диэлектрика и будут проявлять свои свойства как метаматериал [6, 7].

Алгоритм расчета обобщенных параметров структуры из такого метаматериала можно реализовать в следующей последовательности: после

определения коэффициентов поляризуемости спирали ( $\alpha_{ee}$  и  $\alpha_{mm}$ ) вычисляется величина сопротивления  $R$ , а реактивные элементы  $L$  и  $C$  находятся методом подбора [8, 9] на конкретной частоте с применением (13) и (14). Можно также модифицировать эту последовательность, применяя взаимную подстановку.

Второй алгоритм предполагает определение частотных зависимостей самого коэффициента киральности  $\chi$  в зависимости от концентрации спиралевидных элементов [2].

Будем использовать несколько значений параметра  $N$ , количество ЛС считаем равным количеству ПС [5], и введем еще один параметр — абсолютный показатель киральности, зависящий от  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  (диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума):

$$\chi_a = \chi \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}. \quad (15)$$

При представлении киральнозависимой среды метаматериала в виде образца Рис.2 будут справедливы соотношения Максвелла-Гарнетта [4]:

$$\begin{aligned} \frac{|\varepsilon - \varepsilon_s|}{\varepsilon + 2\varepsilon_s} &= n \frac{|\varepsilon_r - \varepsilon_s|}{\varepsilon_r + 2\varepsilon_s}, \\ \varepsilon_s &= \varepsilon_r + \frac{\beta_0^2}{\omega_0^2 + \omega^2}, \\ \chi &= A \frac{\beta_0^2 \omega}{c(\omega_0^2 + \omega^2)}, \end{aligned} \quad (16)$$

где  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_s$  — относительная диэлектрическая проницаемость контейнера, среды диэлектрика и спирали соответственно,  $c$  — скорость света;  $\beta_0$  — параметр, имеющий размерность частоты и связанный с внутренними процессами в среде;  $N$  — объемная концентрация ЛС и ПС в контейнере,  $A$  — нормирующий параметр, имеющий размерность расстояния.

После подстановки второго уравнения (16) в первое можно получить:

$$\varepsilon_r - \varepsilon_s = \frac{|\varepsilon_r + 2\varepsilon_s| |\varepsilon - \varepsilon_s|}{N |\varepsilon + 2\varepsilon_s|}. \quad (17)$$

При этом можно записать:

$$\chi = A \frac{\omega}{c} |\varepsilon_s - \varepsilon_r|. \quad (18)$$

После подстановки соотношения (17) в (18) получаем:

$$\chi = \frac{A\omega}{cN} E_\varepsilon, \quad (19)$$

где  $E_\varepsilon = \frac{|\varepsilon_r + 2\varepsilon_s||\varepsilon_s - \varepsilon|}{|\varepsilon + 2\varepsilon_s|}$  — обобщенный параметр киральной диэлектрической проницаемости;  $\varepsilon_\Sigma = \varepsilon + \varepsilon_s$ .

В предположении отсутствия внешнего контейнера ( $\varepsilon_r = 0$ ) соотношение (19) будет иметь вид  $E_\varepsilon = \frac{2\varepsilon_s|\varepsilon_\Sigma + 2\varepsilon|}{|\varepsilon_\Sigma + \varepsilon_s|}$ .

Полученные равенства связывают три важных параметра киральной среды: коэффициент киральности  $\chi$ , концентрацию  $N$  и частоту  $f$ , что совместно с параметром  $\varepsilon_\Sigma$  будет определять основные проводящие свойства структуры [8, 9].

Графики, построенные по полученным соотношениям, приведены на Рис. 3 и Рис. 4.

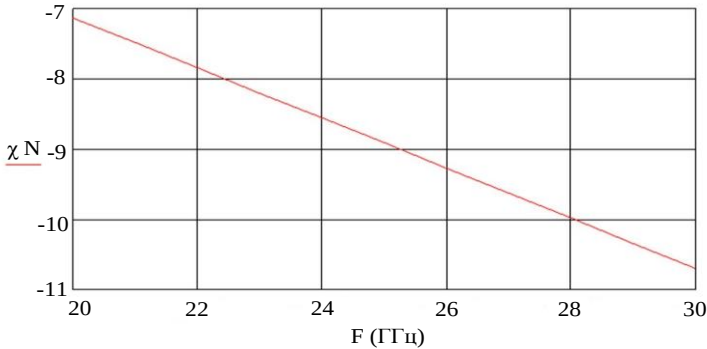


Рис. 3. Частотная зависимость произведения  $\chi N$ .

Fig. 3. Frequency dependence of  $\chi N$

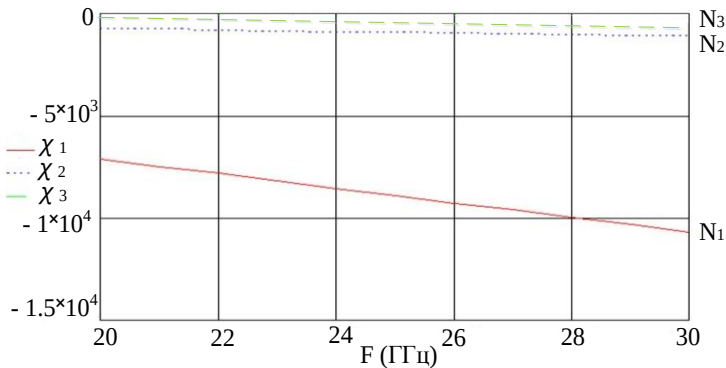


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента киральности  $\chi$  ( $\chi_1$ ,  $\chi_2$  и  $\chi_3$ ) для трех значений концентрации:  $N_1 = 10^{11} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_2 = 10^{12} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_3 = 10^{13} \text{ м}^{-3}$ .

Fig. 4. Frequency dependence of the chirality coefficient  $\chi$  ( $\chi_1$ ,  $\chi_2$  and  $\chi_3$ ) for three concentration values:  $N_1 = 10^{11} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_2 = 10^{12} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_3 = 10^{13} \text{ м}^{-3}$

### 3. Определение коэффициента проницаемости киральных сред

На практике коэффициент киральности определяет через угол поворота  $E$ -плоскополяризованной волны, прошедшей через среду относительно плоскости падающей волны.

Известно [3, 10], что показатель преломления диэлектрической среды равен  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ . Этот параметр входит в состав уравнений:

$$\begin{aligned}\Delta\vec{E} + k^2(n^2 + \chi^2)\vec{E} - 2ik^2\mu\chi\vec{H} &= 0, \\ \Delta\vec{H} + k^2(n^2 + \chi^2)\vec{H} - 2ik^2\mu\chi\vec{E} &= 0.\end{aligned}\quad (20)$$

В этих уравнениях модуль волнового числа для излучения с длиной волны в данной среде  $\lambda$  определяется как параметр  $k = 2\pi/\lambda$ . При этом нужно помнить, что в вещественной среде волновое число электромагнитной волны  $k = k_{\text{вак}}\sqrt{\epsilon\mu}$  связано с  $k_{\text{вак}} = 2\pi/\lambda_{\text{вак}}$ , ( $\lambda_{\text{вак}}$  — длина волны микроволнового излучения в вакууме).

Проведем разделение компонент уравнений (20), для чего вводим параметры напряженностей электрических полей с правокруговой  $\vec{E}_R$  и левокруговой  $\vec{E}_L$  поляризациями (ЛКП и ПКП, Рис. 4).

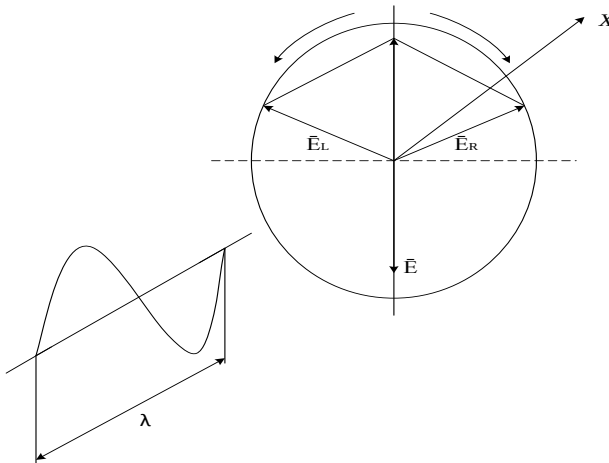


Рис. 4. ЭМВ падающая из  $E$ -плоскостной секторальной рупорной антенны на плоскопараллельный образец кирального материала.

Fig. 4. EMW falling from the  $E$ -planar sectoral horn antenna onto a plane-parallel sample of chiral material

Относительно этих компонент можно определить для заданной киральной среды напряженность плоскополяризованного электрического

поля ЭМВ как векторную сумму напряженностей электрических полей с ЛКП  $\vec{E}_L$  и ПКП  $\vec{E}_R$  поляризациями:  $\vec{E} = \vec{E}_L + \vec{E}_R$ , т. е. их суперпозицией. Вследствие наличия общей связи напряженностей магнитного и электрического полей для такой волны из равенства:  $\vec{H} = in(\vec{E}_R - \vec{E}_L)$  можно провести разделение уравнения (20) на два независимых уравнения:

$$\begin{aligned}\Delta\vec{E}_R + k_R^2\vec{E}_R &= 0, \\ \Delta\vec{E}_L + k_L^2\vec{E}_L &= 0.\end{aligned}\quad (21)$$

Таким образом, волновые числа в киральной среде приобретают компонентную форму:  $k_R = k(n + \chi)$  и  $k_L = k(n - \chi)$ .

На основании наличия связи между показателем преломления вещества и волновым числом можно получить показатели преломления полей с ЛКП и ПКП:  $n_R = n + \chi$  и  $n_L = n - \chi$ , которые находятся с учетом (19).

Согласно феноменологической теории [10] угол поворота плоскости поляризации света в киральной оптически активной среде определяется как:

$$\varphi = \alpha d = \frac{\pi d}{\lambda}(n_R - n_L), \quad (22)$$

где  $d$  — толщина слоя киральной среды (Рис. 5), которую следует выбирать как можно меньшей для улучшения регистрации проводящих свойств. Параметр  $\alpha = \pi(n_R - n_L)/\lambda$  является коэффициентом удельного вращения.

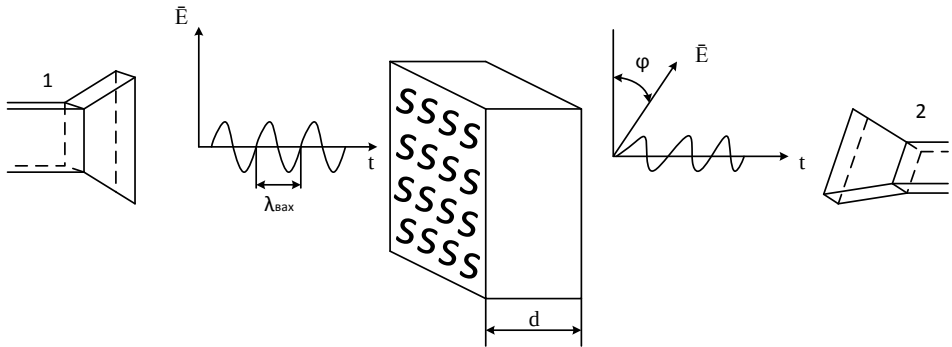


Рис. 5. Метод измерения угла поворота плоскопараллельной поляризованной ЭМВ после прохождения образца с киральной средой [10].

Fig. 5. Method for measuring the angle of rotation of a plane-parallel polarized EMW after passing through a sample with a chiral medium [10]

После подстановки в (22) соотношений для  $n_R$  и  $n_L$  получаем:

$$\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \chi = k\chi d = \alpha d. \quad (23)$$

Тогда коэффициент удельного вращения будет определяться как  $\alpha = k\chi$ .

Следовательно, можно определить физический смысл коэффициента киральности  $\chi$  как параметра, определяемого из величины отношения коэффициента удельного вращения к волновому числу.

Далее из (23) следует:

$$\chi = \frac{\varphi}{dk_{\text{вак}}\sqrt{n}}. \quad (24)$$

Соотношение (24) дает возможность рассчитать параметр киральности данной среды посредством измерения угла поворота плоскости поляризации волны, которая прошла сквозь образец (Рис. 5).

Используя соотношения (19) и (24), можно получить:

$$\varphi \lambda_{\text{вак}}^2 N = an4\pi^2 f^2 d\varepsilon. \quad (25)$$

Отсюда следует окончательное соотношение:

$$n = \frac{\varphi}{d\omega^2} \left( \frac{Nc}{AE_\varepsilon} \right), \quad (26)$$

которое определяет по углу поворота  $E$ -плоскополяризованной ЭМВ собственный коэффициент ее преломления в киральной среде с заданными параметрами.

#### 4. Заключение

Таким образом, в результате предложенных расчетов определены связи и частотные зависимости основных параметров диэлектрических сред с объемными кирально-связанными включениями (на примере спиралей) имеющими конкретные электрофизические параметры, что позволяет на практике проанализировать проводящие особенности таких сред. Кроме этого найдено соотношение, позволяющее рассчитать коэффициент преломления ЭМВ при ее прохождении через объем среды используя удобную практическую методику.

#### Список литературы

1. Осипов О. В., Аралкин М. В. Дементьев А. В. Использование моделей Максвелла — Гарнетта и Бруггемана для описания гетерогенности кирального метаматериала на основе гамма-ионов // Инфокоммуникационные технологии. 2020. Т. 18, № 4. С. 391—402.
2. Малышев И. В., Паршина Н. В., Червяков Г. Г. Распространение ЭМВ в биизотропных средах с равномерным распределением концентрации дисперсных частиц // Специальная техника. 2015. № 1. С. 27—28.



3. Малышев И. В., Паршина Н. В., Осадчий Е. Н. Определение электрофизических параметров спиралевидных включений в диэлектрическую среду для обеспечения киральных свойств // Инженерный вестник Дона. 2020. № 12. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6713>
4. Малышев И. В., Паршина Н. В. Способ нахождения параметра киральности среды на основе анализа материальных уравнений // Инженерный вестник Дона. 2021. № 12. URL: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_34\\_\\_12\\_Malyshev\\_Parshina.pdf\\_ea55a5fc71.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_34__12_Malyshev_Parshina.pdf_ea55a5fc71.pdf)
5. Осипов О. В., Почепцов А. О., Юрасов В. И. Киральный метаматериал для частотно-селективной концентрации энергии сверхвысокочастотного излучения // Инфокоммуникационные технологии. 2014. Т. 12, № 4. С. 76—82.
6. Клюев Д. С., Кубанов В. П., Осипов О. В., Почепцов А. О., Резепова Е. С. Исследование электромагнитных характеристик кирального метаматериала на основе идеально проводящих элементов в виде взаимно ортогональных спиралей // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2017. Т. 20, № 1. С. 4—10.
7. Malyshev I. V., Parshina N. V. The method of definition the electrophysical parameters of spiral inclusions in chiral metamaterials. In : 2020 International conference on “Physics and mechanics of new materials and their applications” (PHENMA 2020). Kitakyushu, Japan, 2021. С. 173—174.
8. Sihvola A., Lindell I., Oksanen M., Hujanen F. Broadband Microwave Measurements and Analysis of Artificial Chiral Materials. In : 1994 24<sup>th</sup> European Microwave Conference, IEEE. 1994. Т. 6, № 2. С. 378—383.
9. Третьяков С. А. Электродинамика сложных сред : киральные, биизотропные и некоторые бианизотропные материалы // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39, № 10. С. 1457—1470.
10. Патент RU 2418292C1, МПК G01N 23/02(2006.01). Способ определения параметра киральности искусственных киральных сред. Волобуев А. Н., Осипов О. В., Панфёрова Т. А. Заявл. 22. 03.2010, № 2010110767/07, Оpubл. 10.05.2011, Бюл. № 13.

### Информация об авторах

**Малышев Игорь Владимирович**, к. т. н., доцент кафедры радиотехнической электроники и наноэлектроники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета, г. Таганрог, Российская Федерация.

**Паршина Наталья Валерьевна**, к. т. н., доцент кафедры радиотехнической электроники и наноэлектроники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета, г. Таганрог, Российская Федерация.

**Дубченко Никита Иванович**, аспирант кафедры радиотехнической электроники и наноэлектроники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета, г. Таганрог, Российская Федерация.

# Investigation of the Permeability and Refraction of a Plane-Polarized EMW Interacting with a Dielectric Chiral Medium

I. V. Malyshev, N. V. Parshina, and N. I. Dubchenko

*Institute of Nanotechnology, Electronics and Instrumentation  
of the Southern Federal University  
2, Shevchenko str., Taganrog, Rostov region, 347922, Russian Federation  
ivmalyshev@srfedu.ru*

Received: May 20, 2023

Peer-reviewed: May 20, 2023

Accepted: June 3, 2023

**Abstract:** Based on consideration of the well-known Maxwell and Maxwell–Garnett relations for dielectric substrates, presented in the form of a bulk dielectric (alloy) with chirally-coupled bulk structures distributed in it (for example, left-handed and right-handed spirals), two algorithms are proposed, determining the main connected with each other parameters of the chirality coefficient, concentration of chiral particles and permittivities. This part of the work is of a theoretical nature and is considered in relation to the microwave frequency range. In the second part of the work, a method is given for finding the refractive index of a plane-polarized EMW as it passes through a chiral medium. In this case, an original method is used, based on the relationship between the chirality coefficient and the angle of rotation of a wave that has passed through a given medium with given electrophysical parameters.

**Keywords:** dielectric substrates, chirally coupled structures, chirality coefficient, reflection and refraction coefficients, Maxwell–Garnett equations, horn antenna, circular polarization.

**For citation (IEEE):** I. V. Malyshev, N. V. Parshina, and N. I. Dubchenko, “Investigation of the Permeability and Refraction of a Plane-Polarized EMW Interacting with a Dielectric Chiral Medium,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 4, pp. 386–397, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.4.29. (In Russ.).

## References

- [1] M. V. Aralkin, A. N. Dementyev, and O. V. Osipov, “The Using of Maxwell–Garnett and Bruggman Models to Describe Heterogeneity of a Chiral Metamaterial Based on Gammadi-*ons*,” *Infokommunikacionnye Tehnologii*, vol. 18, no. 4, pp. 391–402, 2020. (In Russ.).
- [2] I. V. Malyshev, N. V. Parshina, and G. G. Chervyakov, “Electromagnetic Wave Propagation in Bi-Isotropic Media with Uniform Distribution of Dispersed Particles Concentration,” *Spetsial'naya Tekhnika*, no. 1, pp. 41–43, 2015. (In Russ.).

- [3] I. V. Malyshev, N. V. Parshina, and E. N. Osadchiy, "Determination of the electrophysical parameters of spiral inclusions in a dielectric medium to ensure chiral properties," *Inzhenernyy Vestnik Dona*, no. 12, 2020. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6713>. (In Russ.).
- [4] I. V. Malyshev and N. V. Parshina, "A method for finding the chirality parameter of a medium based on the analysis of material equations," *Inzhenernyy Vestnik Dona*, 2021. № 12. URL: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_34\\_\\_12\\_Malyshev\\_Parshina.pdf\\_ea55a5fc71.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_34__12_Malyshev_Parshina.pdf_ea55a5fc71.pdf). (In Russ.).
- [5] O. V. Osipov, A. O. Pochepcov, and V. I. Yurasov, "Chiral Metamaterials for Frequency Selective Concentration Microwave Energy," *Infokommunikacionnye Tehnologii*, vol. 12, no. 4, pp. 76–82, 2014. (In Russ.).
- [6] D. S. Klyuev, V. P. Kubanov, O. V. Osipov, A. O. Pochepcov, and E. S. Rezepova, "Research of electromagnetic characteristics of chiral metamaterial based on the thin-wire perfectly conducting elements consisting of mutually orthogonal helices," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 4–10, 2017. (In Russ.).
- [7] I. V. Malyshev and N. V. Parshina, "The method of definition the electrophysical parameters of spiral inclusions in chiral metamaterials," in : *2020 International conference on "Physics and mechanics of new materials and their applications" (PHENMA 2020)*, Kitakyushu, Japan, pp. 173–174, 2021.
- [8] A. Sihvola, I. Lindell, M. Oksanen, and F. Hujanen, "Broadband Microwave Measurements and Analysis of Artificial Chiral Materials," 1994 24<sup>th</sup> European Microwave Conference, IEEE, vol. 1, pp. 378–383, 1994, doi: 10.1109/euma.1994.337238.
- [9] S. A. Tret'yakov, "Electrodynamics of complex media – chiral, biisotropic, and some bianisotropic materials," *Radiotekhnika i Elektronika*, vol. 39, no. 10, pp. 1457–1470, 1994. (In Russ.).
- [10] A. N. Volobuev, O. V. Osipov, and T. A. Panferova, "Method for determining the chirality parameter of artificial chiral media," Patent RU 2418292C1, May 10, 2011. (In Russ.).

### Information about the authors

**Igor V. Malyshev**, Ph.D., Associate Professor of Radio Electronics and Nanoelectronics Department of the Institute of Nanotechnologies, Electronics and Equipment Engineering in Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation.

**Natalia V. Parshina**, Ph.D., Associate Professor of Radio Electronics and Nanoelectronics Department of the Institute of Nanotechnologies, Electronics and Equipment Engineering in Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation.

**Nikita I. Dubchenko**, Postgraduate student of Radio Electronics and Nanoelectronics Department of the Institute of Nanotechnologies, Electronics and Equipment Engineering in Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation.

УДК 621.3.04:537.632/.636:53.098:538.955

## **Изучение влияния слабых импульсов магнитного поля на локальные свойства ленточных аморфных сплавов Fe(Ni, Cu)(SiB)**

<sup>1\*</sup> Каминская Т. П., <sup>2</sup> Степович М. А., <sup>3</sup> Шипко М. Н.,  
<sup>3</sup> Тихонов А. И., <sup>1</sup> Попов В. В.

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва, ГСП-1, 119991, Российская Федерация

<sup>2</sup> Калужский государственный университет им. К. Э. Циолковского  
Калуга, 248023, Российская Федерация

<sup>3</sup> Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина  
Иваново, 153003, Российская Федерация

\*ktp53@mail.ru

Получено: 20 мая 2023 г.

Отрецензировано: 31 мая 2023 г.

Принято к публикации: 31 мая 2023 г.

**Аннотация:** Методами атомной силовой микроскопии и магнитной силовой микроскопии исследовано влияние импульсов слабого магнитного поля на локальные свойства ленточных аморфных сплавов Fe(Ni, Cu)(SiB) толщиной около 100 мкм, шириной 10 мм, длиной 50 мм, которые были получены методом сверхбыстрого охлаждения расплава на вращающемся медном барабане. На поверхности ленты, прилегавшей к медному барабану, практически отсутствовали участки с низкой шероховатостью, что не позволило провести последующие исследования этой стороны ленты методом магнитно-силовой микроскопии. Этим методом исследована другая, свободная поверхность фольги, не прилегавшая к медному барабану и не имевшая существенных шероховатостей. До воздействия импульсов магнитного поля на фольгу магнитный контраст на свободной стороне ленты не наблюдался. После магнитоимпульсной обработки на этой стороне фольги был зарегистрирован магнитный контраст: стали видны полосовые домены шириной 0,6—0,8 мкм, а на дефектах структуры также замыкающие домены, т. н. клиновидные домены Нееля, шириной от 1 мкм до 1,6 мкм. Результаты исследования позволяют говорить, что потери на перемагничивание в большой степени связаны с потерями, обусловленными вихревыми токами, и связаны с шириной доменов, которая зависит от режимов магнитоимпульсной обработки незначительно. Полученные результаты исследований могут быть использованы для уточнения методики снятия напряжений, возникающих в процессе изготовления аморфных лент.

**Ключевые слова:** атомная силовая микроскопия, магнитно-силовая микроскопия, магнитоимпульсная обработка, полосовые домены, замыкающие домены.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Каминская Т. П., Степович М. А., Шипко М. Н., Тихонов А. И., Попов В. В. Изучение влияния слабых импульсов магнитного поля на локальные свойства ленточных аморфных сплавов Fe(Ni, Cu)(SiB) // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 4. С. 398—409.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018):** Каминская, Т. П. Изучение влияния слабых импульсов магнитного поля на локальные свойства ленточных аморфных сплавов Fe(Ni, Cu)(SiB) / Т. П. Каминская, М. А. Степович, М. Н. Шипко, А. И. Тихонов, В. В. Попов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2023. — Т. 6, № 4. — С. 398—409.

## 1. Введение

Качество цифровых высокочастотных трансформаторов обеспечивается уровнем электромагнитных свойств ленточных аморфных сплавов, используемых при изготовлении магнитопроводов. Одним из таких сплавов является Fe(Ni, Cu)(SiB). Среди свойств таких сплавов особое место занимают коэрцитивная сила, магнитострикция, магнитные потери, которые лимитируются химическим составом сплава, состоянием поверхности, особенностями ближнего порядка. Использование только традиционных металлургических способов для управления этими свойствами затруднено вследствие высокой степени неопределенности влияния состава аморфного сплава и технологических параметров на магнитостатическую энергию дефектов, реальную магнитную структуру поверхности ленточных образцов [1—3]. Такие факторы оказывают существенное влияние на процессы перемагничивания и, как следствие, на магнитные потери в сердечниках, включающие гистерезисные и более значительные вихревые потери.

Перспективным способом контролируемого изменения вихревых потерь магнитных аморфных сплавов является управление динамикой магнитных доменов, поскольку скорость перемещения доменной стенки при перемагничивании образца связана с электродвижущей силой, возникающей на его локальном участке и ограничивающей вихревые потери. В свою очередь, эта скорость связана с шириной доменов, которая определяется константой анизотропии, намагниченностью насыщения сплава, внутренними напряжениями, вызванными специфическим состоянием поверхности фольг [4—7].

Снижения напряжений, определяющих параметры доменной структуры, возможны не только в результате воздействия лазерного излучения, электронов, ионов — модификация напряженного состояния поверхности

сплава возможна и в результате магнитоимпульсного воздействия [8—12]. Воздействие импульсов слабых магнитных полей на сплавы обеспечивает проявление магнитопластического эффекта, снижение их склонности к хрупкому разрушению. Изучение влияния слабых импульсов магнитного поля на локальные свойства ленточных аморфных сплавов Fe(Ni, Cu)(SiB) и составляет предмет рассмотрения настоящей работы.

## 2. Материалы и методы

Образцы ленточных аморфных сплавов Fe(Ni, Cu)(SiB) представляли собой ленту (фольгу) толщиной около 100 мкм, шириной 10 мм, длиной 50 мм, которые были получены методом сверхбыстрого охлаждения расплава на вращающемся медном барабане. Для их магнитоимпульсной обработки (МИО) использовали импульсы магнитного поля амплитудой  $(5—8) \cdot 10^3 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$  и длительностью (0,1—0,5) с. Количество импульсов составляло 10—50, интервал между импульсами — (1—2) с.

Локальные магнитные свойства фольги исследовались методами атомной силовой микроскопии (АСМ) и магнитно-силовой микроскопии (МСМ) по стандартной двухпроходной методике [13, 14] с использованием сканирующего зондового микроскопа *SMENA-A*, платформа «*Solver*» (*NT-MDT*, РФ, г. Зеленоград, Москва). Для МСМ исследований предварительно в растровом электронном микроскопе выбирались участки фольги с низкой шероховатостью [15].

## 3. Результаты исследований и их обсуждение

Ранее [15] исследования структуры поверхности фольги в растровом электронном микроскопе показали, что на поверхности ленты, прилегавшей к медному барабану, практически отсутствовали участки с низкой шероховатостью, что не позволило провести последующие МСМ-исследования этой стороны ленты. Методом МСМ исследована другая, свободная поверхность фольги, не прилегавшая к медному барабану и не имевшая шероховатостей, препятствующих МСМ-исследованиям.

Для предварительной оценки профиля рельефа поверхности в нанометровом масштабе проводилось изучение различных участков фольги методом АСМ. В качестве примера на рис. 1 показан участок фольги, полученный при АСМ исследованиях свободной поверхности ленты, не прилегавшей к медному барабану. На рис. 1а показан профиль высот, характеризующий неровности этого участка, а на рис. 1б и 1в — изображение этого участка поверхности в режиме латеральных сил (1б) и в

режиме фазового контраста (1в); профиль высот получен при однострочном сканировании по прямой в средней области участка (для изображений рис. 1б и рис.1в — по горизонтали). Для этого участка фольги перепад высот не превышает 26 нм на расстоянии 2,5 мкм.

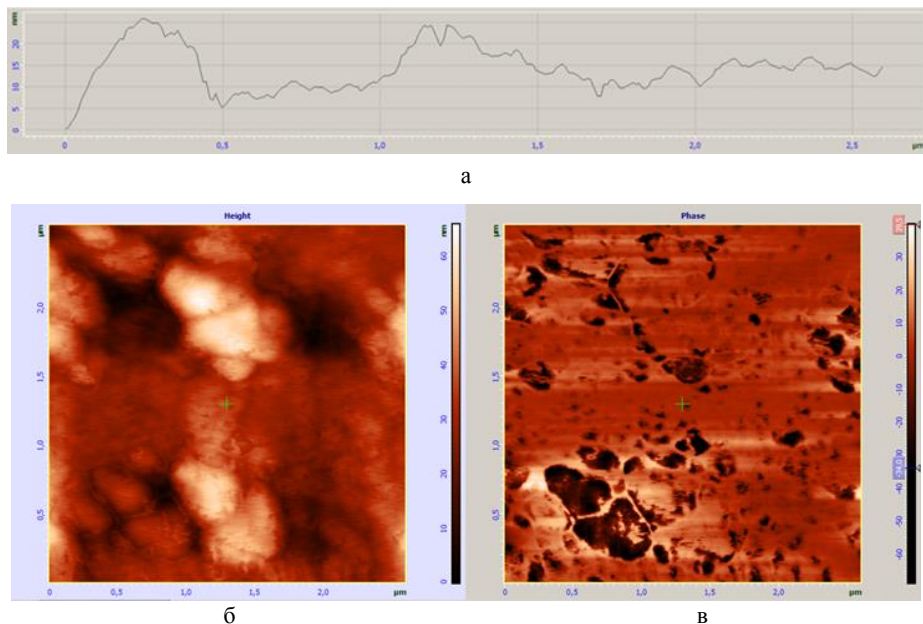
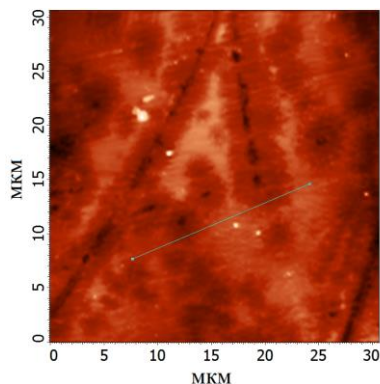


Рис. 1. а — профиль сечения фольги, иллюстрирующий характер неровностей в средней части выбранной области; б — изображение участка фольги, полученное в АСМ, иллюстрирующий характер неровностей поверхности фольги размером  $2,5 \times 2,5$  мкм; в — изображение того же участка фольги в режиме фазового контраста АСМ.

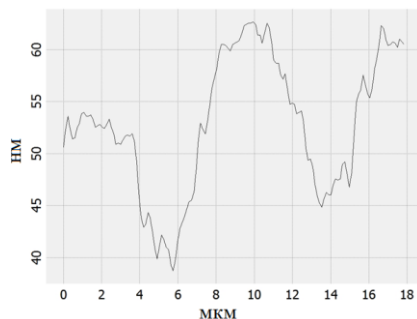
Fig. 1. а – profile of the foil section, illustrating the nature of irregularities in the middle part of the selected area; б – image of a foil section obtained in AFM, illustrating the nature of the irregularities of the foil surface with a size of  $2.5 \times 2.5$   $\mu\text{m}$ ; в – image of the same section of the foil in the AFM phase contrast mode

Участок фольги с увеличением на порядок меньшим, чем на рис. 1, показан на рис. 2а и рис. 2в. На рис. 2а также показан отрезок прямой, вдоль которого профиль шероховатости имел перепад высот не более 25 нм на расстоянии примерно 20 мкм — см. рис. 2б. Уточненные данные изучения различных участков фольги показали, что перепад высот на свободной стороне аморфной ленты обычно не превышает 25—30 нм на расстояниях примерно 20—30 мкм.

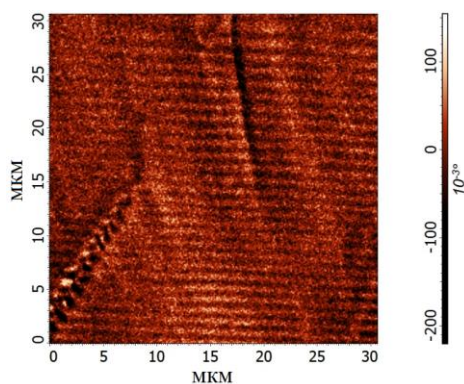
После МИО фольги характер шероховатости не изменился и, как и ранее [15], наиболее заметные изменения после МИО были зарегистриро-



а



б



в

Рис. 2. а — изображение участка свободной поверхности фольги, полученное в АСМ; б — профиль сечения фольги, иллюстрирующий характер неровностей вдоль отрезка прямой, указанной на рис. 2а; в — МСМ-изображение участка свободной поверхности фольги, приведенного на рис. 2а.

Fig. 2. а – image of the area of the free surface of the foil, obtained in AFM; б – profile of the foil section, illustrating the nature of irregularities along the segment of the straight line indicated in Fig. 2а; в – MFM image of the area of the free surface of the foil shown in Fig. 2а

ваны на МСМ-снимках свободной стороны образцов при использовании 20 импульсов магнитного поля.

На МСМ-снимках свободной стороны до МИО доменной структуры не наблюдалось. После МИО на этой стороне фольги был зарегистрирован МСМ-контраст: стали видны полосовые домены, а на дефектах структуры также замыкающие домены, т. н. клиновидные домены Нееля [16]. На рис. 2в полосовые домены видны на всей площади этого участка фольги, а замыкающие домены наиболее ярко видны в нижней левой части рис. 2в на дефекте структуры (царапине). Магнитный контраст также проявляется и на других царапинах, однако в меньшей мере.

Как известно [17], стенки замыкающих доменов прикрепляются к областям, содержащим включения либо дефекты (разрывы, царапины), прочнее, чем к участкам гомогенного материала, в результате движение стенок в этой области замедляется и магнитостатическая энергия уменьшается. Этот эффект хорошо иллюстрируется на рис. 3 и рис. 4.



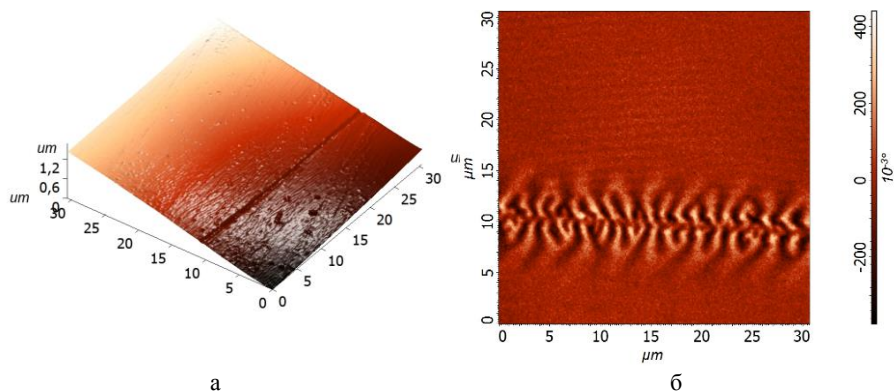


Рис. 3. а — АСМ-изображение участка свободной стороны фольги с царапиной на поверхности; б — МСМ-изображение этого же участка фольги с замыкающими доменами. В верхней части рис. 3б видны полосовые домены.

Fig. 3. а – AFM image of a section of the free side of the foil with a scratch on the surface; б – MFM image of the same section of the foil with trailing domains. At the top of Fig. 3b shows stripe domains

На рис. 3а приведено 3D-изображение поверхности участка фольги, полученное в АСМ, а на рис. 3б — МСМ-изображение этого же участка фольги с замыкающими доменами шириной от 1 мкм до 1,6 мкм, а в верхней части видны полосовые домены шириной 0,6—0,8 мкм.

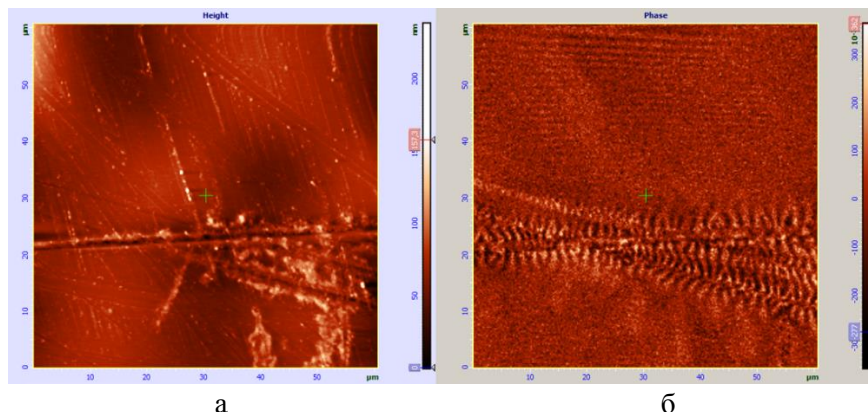


Рис. 4. а — АСМ-изображение участка свободной стороны фольги с царапинами на поверхности; б — МСМ-изображение этого же участка фольги с замыкающими доменами вокруг царапин. В верхней части рис. 4б видны полосовые домены.

Fig. 4. а – AFM image of a section of the free side of the foil with scratches on the surface; б – MFM image of the same foil section with trailing domains around the scratches. At the top of Fig. 4b shows stripe domains

Отметим, что потери на перемагничивание связаны с шириной доменов [15], которая согласно результатам МСМ-исследований изменяется незначительно. Зависимость удельных потерь на перемагничивание  $P$  от магнитной индукции поля  $B_S$  нелинейная и ее можно описать квадратичной функцией — рис. 5.

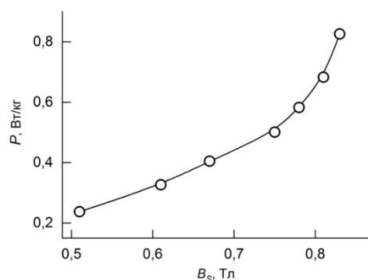


Рис. 5. Зависимость удельных потерь  $P$  от магнитной индукции поля  $B_S$ .

Fig. 5. Dependence of specific losses  $P$  on the magnetic field induction  $B_S$

#### 4. Выводы

Установлено влияние МИО на магнитные свойства поверхности аморфных сплавов  $\text{Fe}(\text{Ni}, \text{Cu})(\text{SiB})$ . Результаты исследования позволяют говорить, что потери на перемагничивание в большей степени связаны с потерями, обусловленными вихревыми токами, и связаны с шириной доменов, которая зависит от режимов МИО незначительно. Полученные результаты исследований могут быть использованы для уточнения методики снятия напряжений, возникающих в процессе изготовления аморфных лент.

#### Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Правительства Калужской области № 23-21-10069, <https://rscf.ru/project/23-21-10069/>.

#### Список литературы

1. Глезер А. М., Молотиллов Б. В. Структура и механические свойства аморфных сплавов. М. : Металлургия, 1992. 207 с.
2. Стародубцев Ю. Н., Белозеров В. Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2002. 376 с.
3. Стогней О. В. Физика аморфных металлических сплавов. Учебное пособие. Воронеж : 2007. 139 с.
4. Глезер А. М., Плотникова М. Р. Влияние мегапластической деформации на структуру и магнитные свойства аморфных сплавов на основе железа и никеля // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер. Математика, физика. 2011. № 11(106). Вып. 23. С. 159—165.
5. Драгошанский Ю. Н., Пудов В. И. Улучшение магнитной структуры и свойств магнитотяжких сплавов за счет модифицирования поверхности // Физика и химия обработки материалов. 2013. № 3. С. 44—52.

6. Стародубцев Ю., Белозеров В. Аморфные металлические материалы // Силовая электроника. 2009. № 2. С. 86—89.
7. Сокол-Кутыловский О. Л. Некоторые перспективы применения аморфных ферромагнитных сплавов // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 5-3 (47). С. 176—179.
8. Альшиц В. И., Даринская Е. В., Колдаева М. В., Петржик Е. А. Магнитоэластический эффект : основные свойства и физические механизмы // Кристаллография. 2003. Т. 48, № 5. С. 826—854.
9. Шипко М. Н., Тихонов А. И., Степович М. А., Вирюс А. А., Каминская Т. П., Коровушкин В. В., Савченко Е. С., Еремин И. В. Влияние магнитоимпульсной обработки на микроструктуру и магнитные свойства аморфной электротехнической стали // Известия РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82, № 8. С. 1090—1095.
10. Viryus A. A., Kaminskaya T. P., Shipko M. N., Bakhteeva N. D., Korovushkin V. V., Savchenko A. G., Stepovich M. A., Savchenko E. S., Todorova E. V. Microscopic research of amorphous alloys AlFeNiLa exposed to magnetic pulse processing // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 848. Art. no. 012085.
11. Шипко М. Н., Сибирев А. Л., Степович М. А., Тихонов А. И., Савченко Е. В. Влияние магнитоимпульсной обработки на эмиссионные и магнитные свойства поверхностного слоя аморфных сплавов, используемых в электротехнике // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2021. № 9. С. 80—85.
12. Шипко М. Н., Степович М. А., Сибирев А. Л., Тихонов А. И., Савченко Е. В., Каминская Т. П. Влияние магнитоимпульсной обработки на состояние поверхности, эмиссионные и магнитные свойства аморфных магнитных сплавов // Известия РАН. Серия физическая. 2021. Т. 85, № 11. С. 1528—1531.
13. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений. Нижний Новгород : Институт физики микроструктур РАН, 2004. 114 с.
14. Meyer E., Hug H. J., Binnig R. Scanning Probe Microscopy. The Lab on a Tip. Berlin, Heidelberg : Springer, 2004. 210 p.
15. Шипко М. Н., Каминская Т. П., Степович М. А., Вирюс А. А., Тихонов А. И. О влиянии магнитоимпульсной обработки на структуру поверхности и магнитные свойства ленточных аморфных сплавов Fe(Ni, Cu)(SiB) // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2023. № 2. С. 17—22.
16. Вонсовский С. В. Магнетизм. М. : Наука, 1984, 208 с.
17. Андреева Н. В., Филимонов А. В., Рудской А. И., Бурханов Г. С., Терёшина И. С., Политова Г. А., Пелевин И. А. Исследование наноструктурированных магнитотвердых материалов системы Nd-Нo-Fe-Co-B методами атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопии // Физика твердого тела. 2016. Т. 58, № 9. С. 1798—1805.

### Информация об авторах

**Каминская Татьяна Петровна**, кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник кафедры общей физики физического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва.

**Степович Михаил Адольфович**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики и математики Калужского государственного университета им. К. Э. Циолковского, Калуга.

**Шипко Михаил Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры физики Ивановского государственного энергетического университета им. В. И. Ленина, Иваново.

**Тихонов Андрей Ильич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики Ивановского государственного энергетического университета им. В. И. Ленина, Иваново.

**Попов Владимир Викторович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры общей физики физического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва.

# Studying the Influence of Weak Impulses Magnetic Field on Local Properties Ribbon Amorphous Alloys Fe(Ni, Cu)(SiB)

T. P. Kaminskaya<sup>1</sup>, M. A. Stepovich<sup>2</sup>, M. N. Shipko<sup>3</sup>,  
A. I. Tikhonov<sup>3</sup>, and V. V. Popov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation

<sup>2</sup>Tsiolkovsky Kaluga State University, Kaluga, 248023, Russian Federation

<sup>3</sup>Lenin Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, 153003, Russian Federation  
ktp53@mail.ru

Received: May 20, 2023

Peer-reviewed: May 20, 2023

Accepted: June 3, 2023

**Abstract:** Atomic force microscopy and magnetic force microscopy have been used to study the influence of weak magnetic field pulses on the local properties of ribbon amorphous Fe(Ni, Cu)(SiB) alloys about 100  $\mu\text{m}$  thick, 10 mm wide, and 50 mm long, which were obtained by ultrafast cooling of the melt on a rotating copper drum. On the surface of the tape adjacent to the copper drum, there were practically no areas with low roughness, which did not allow subsequent studies of this side of the tape by magnetic force microscopy. This method was used to investigate another, free surface of the foil, which was not adjacent to the copper drum and did not have significant roughness. Prior to the impact of magnetic field pulses on the foil, no magnetic contrast was observed on the free side of the ribbon. After magnetic pulse processing, a magnetic contrast was registered on this side of the foil: stripe domains 0.6–0.8  $\mu\text{m}$  wide became visible, and closing domains, became visible on structural defects, wedge-shaped Neel domains, from 1  $\mu\text{m}$  to 1.6  $\mu\text{m}$  wide. The results of the study allow us to say that the magnetization reversal losses are to a large extent associated with losses due to eddy currents and are associated with the domain width, which depends slightly on the modes of magnetic pulse processing. The obtained results of the re-search can be used to refine the method for relieving stresses arising in the process of manufacturing amorphous ribbons.

**Keywords:** atomic force microscopy, magnetic force microscopy, magnetic pulse processing, stripe domains, closure domains.

**For citation (IEEE):** T. P. Kaminskaya, M. A. Stepovich, M. N. Shipko, A. I. Tikhonov, and V. V. Popov, “Studying the Influence of Weak Impulses Magnetic Field on Local Properties Ribbon Amorphous Alloys Fe(Ni, Cu)(SiB),” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 4, pp. 398–409, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.4.30. (In Russ.).

## References

- [1] A. M. Glezer and B. V. Molotilov, *Structure and mechanical properties of amorphous alloys*. Moscow : Metallurgiya, 1992. (In Russ.).
- [2] Yu. N. Starodubtsev and V. Ya. Belozerov, *Magnetic properties of amorphous and nanocrystalline alloys*. Yekaterinburg : Ural University Press, 2002. (In Russ.).
- [3] O. V. Stogney, *Physics of amorphous metal alloys*. Voronezh : 2007. (In Russ.).
- [4] A. M. Glezer and M. R. Plotnikova, "Influence of megaplastic deformation on the structure and magnetic properties of amorphous alloys based on iron and nickel," *Scientific Bulletin of the Belgorod State University. Ser. Math., physics*, no. 11(106), iss. 23, pp. 159–165, 2011. (In Russ.)
- [5] Yu. N. Dragoshansky and V. I. Pudov, "Improvement of the magnetic structure and properties of soft magnetic alloys due to surface modification," *Physics and Chemistry of Materials Processing*, no. 3, pp. 44–52, 2013 (In Russ.).
- [6] Y. Starodubtsev and V. Belozerov, "Amorphous metallic materials," *Power electronics*, no. 2, pp. 86–89, 2009. (In Russ.).
- [7] O. L. Sokol-Kutylovsky, "Some prospects for the use of amorphous ferromagnetic alloys," *International Scientific Research Journal*, no. 5-3 (47), pp. 176–170, 2016, doi: 10.18454/IRJ.2016.47.226. (In Russ.).
- [8] V. I. Alshits, E. V. Darinskaya, M. V. Koldaeva, and E. A. Petrzhik, "Magnetoplastic effect : Basic properties and physical mechanisms," *Crystallography Reports*, vol. 48, no. 5, pp. 768–795, 2003, doi: 10.1134/1.1612598. (In Russ.).
- [9] M. N. Shipko, A. I. Tikhonov, M. A. Stepovich, A. A. Viryus, T. P. Kaminskaya, V. V. Korovushkin, E. S. Savchenko, and I. V. Eremin, "Effect of Magneto-Pulse Processing on the Microstructure and Magnetic Behavior of Amorphous Electrotechnical Steel," *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, vol. 82, no. 8, pp. 988–992, 2018, doi: 10.3103/S1062873818080373.
- [10] A. A. Viryus, T. P. Kaminskaya, M. N. Shipko, N. D. Bakhteeva, V. V. Korovushkin, A. G. Savchenko, M. A. Stepovich, E. S. Savchenko, and E. V. Todorova, "Microscopic research of amorphous alloys AlFeNiLa exposed to magnetic pulse processing," *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, vol. 848, Art. no. 012085, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/848/1/012085.
- [11] M. N. Shipko, A. L. Sibirev, M. A. Stepovich, A. I. Tikhonov, and E. V. Savchenko, "Effect of Magnetic-Pulse Processing on the Emission and Magnetic Properties of the Surface Layer of Amorphous Alloys Used in Electrical Engineering," *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, vol. 15, no. 5, pp. 970–974, 2021, doi: 10.1134/S1027451021050190.
- [12] M. N. Shipko, M. A. Stepovich, A. L. Sibirev, A. I. Tikhonov, E. S. Savchenko, and T. P. Kaminskaya, "Effect of magnetic pulse treatment on the surface state, emission, and magnetic properties of amorphous magnetic alloys," *Bulletin of the Russian Academy of Sciences : Physics*, vol. 85, no. 11, pp. 1191–1194, 2021, doi: 10.3103/S1062873821110356.
- [13] V. L. Mironov, *Fundamentals of scanning probe microscopy. Textbook for senior students of higher educational institutions*. Nizhny Novgorod : Institute of Physics of Microstructures RAS, 2004. (In Russ.).
- [14] E. Meyer, H. J. Hug, R. Bennewitz, *Scanning Probe Microscopy. The Lab on a Tip*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2004.
- [15] M. N. Shipko, T. P. Kaminskaya, M. A. Stepovich, A. A. Viryus, and A. I. Tikhonov, "On the Effect of Magnetic Pulsed Treatment on the Surface Structure and Magnetic Properties of Ribbon Amorphous Fe(Ni,Cu)(SiB) Alloys," *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, vol. 17, no. 1, pp. 186–190, 2023, doi: 10.1134/S1027451023010378.

- [16] S. V. Vonsovsky, *Magnetism*. Moscow : Nauka, 1984. (In Russ.).
- [17] N. V. Andreeva, A. V. Filimonov, A. I. Rudskoy, G. S. Burkhanov, I. S. Tereshina, G. A. Politova, and I. A. Pelevin, "Investigation of nanostructured magnetically hard materials of the Nd-Ho-Fe-Co-B system by methods of atomic force and magnetic force microscopy," *Solid State Physics*, vol. 58. no. 9, pp. 1798–1805, 2016. (In Russ.).

### Information about the authors

**Tatiana P. Kaminskaya**, PhD. Sci., Assoc. Prof., Researcher Department of General Physics, Faculty of Physics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation.

**Mikhail A. Stepovich**, Dr. Sci., Prof., Prof. of the department of physics and mathematics Tsiolkovsky Kaluga State University, Kaluga, Russian Federation.

**Mikhail N. Shipko**, Dr. Sci., Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation, Prof. of the department of physics Lenin Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation.

**Andrey I. Tikhonov**, Dr. Sci., Prof., head of the department of physics Lenin Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation.

**Vladimir V. Popov**, PhD. Sci., Senior Researcher Department of General Physics, Faculty of Physics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation.

УДК 621.37-621.39(091)

## **Научные открытия и изобретения Ли де Фореста, способствовавшие прогрессу в радиоламповых технологиях и развитии социума**

Пестриков В. М.

*Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения  
ул. Правды, 13, Санкт-Петербург, 191119, Российская Федерация  
pvm205@yandex.ru*

Получено: 2 июля 2023 г.

Отрецензировано: 5 июля 2023 г.

Принято к публикации: 10 июля 2023 г.

**Аннотация:** Рассмотрен и сделан анализ научных открытий и изобретений Ли де Фореста, которые оставили заметный след в радиоламповых технологиях и социуме. Описана борьба де Фореста за приоритет в открытии обратной связи в усилителе звуковой частоты. Отмечено первенство де Фореста в записи звука на киноленту на основе изобретенной им технологии Phonofilm. Показано, как в драматической жизни де Фореста нашлось место не только занятиям научными исследованиями, но и любви к женщинам.

**Ключевые слова:** Ли де Форест, обратная связь, регенеративный радиоприем, гридлик, триоды DV, Фонофильм, Мари Москони.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Пестриков В. М. Научные открытия и изобретения Ли де Фореста, способствовавшие прогрессу в радиоламповых технологиях и развитии социума // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 4. С. 410—439.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018):** Пестриков, В. М. Научные открытия и изобретения Ли де Фореста, способствовавшие прогрессу в радиоламповых технологиях и развитии социума / В. М. Пестриков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 4. — С. 410—439.

### **1. Введение**

Данная статья является последней в серии статей [1—4] о том, как американский радиотехник Ли де Форест (26.08.1873—30.06.1961) изобрел вакуумную трехэлектродную радиолампу, и благодаря своей целеустремленности и настойчивости сумел с помощью своего изобретения и при под-



держке своего друга Джона Стоуна, совершить научно-техническую революцию в области радиотехники.

Современные средства массовой информации происходят от одного общего источника, изобретения, о котором сегодня редко упоминают, но которое сыграло столь же решающую роль в формировании общества, как лампочка накаливания или автомобильный двигатель внутреннего сгорания. Таким изобретением явилась вакуумная трехэлектродная лампа под названием «аудион», которая открыла направление разработки первого электронного усилителя звука. Создателем этой революционной лампы явился американский радиотехник Ли де Форест [5]. Благодаря этому AT&T, купив патенты де Фореста, сумела разработать надежный телефонный ретранслятор для осуществления дальней междугородной телефонной связи [6, 7], а компания *General Electric* смогла создать речевой модулятор для высокочастотных генераторов переменного тока [8]. Доведение промышленными лабораториями этих компаний примитивного триода де Фореста до промышленного образца сделало возможным практическую радиотелефонию доступной человеческому обществу.

Де Форест в то время не мог подумать о том, что он открыл век электроники. Аудион был первым устройством, позволявшим точно управлять электрическим током через интенсивность потоков электронов. Триодные вакуумные лампы по мере развития стали в XX веке технологическим центром современной индустрии связи, развлечений и средств массовой информации. Их можно было найти в радиопередатчиках и приемниках, в комплектах *Hi-Fi*, в системах громкой связи, в гитарных усилителях, киноаппаратуре и многом другом. Массивы ламп также служили процессорами и системами хранения данных во многих ранних цифровых компьютерах. В первых мощных вычислительных системах их часто было несколько десятков тысяч. В 50-е годы XX века электронные лампы начали заменяться меньшими по размеру, дешевыми и более надежными твердотельными транзисторами, что привело к резкому росту популярности электронных приборов. В миниатюрной форме триодного транзистора изобретение Ли де Фореста стало рабочей лошадкой нашего информационного века. Твердотельные транзисторы давно заменили громоздкие аудионные лампы, первоначально использовавшиеся в различных радиоустройствах благодаря изобретению и энтузиазму Ли Де Фореста. К концу своей карьеры он получил большое количество патентов на различные изобретения и тем самым проложил путь к электронному веку. Де Форест называл себя «отцом радио», даже после того, как он перестал активно заниматься исследованиями в области беспроводной связи и в область его научных интересов были включены другие инновации, в первую очередь запись звука на киноплёнку

(система *Phonofilm*). “*Father of Radio*” (Отец радио), такое название он дал своим мемуарам, вышедшим в 1950 году, рис. 1 [9].

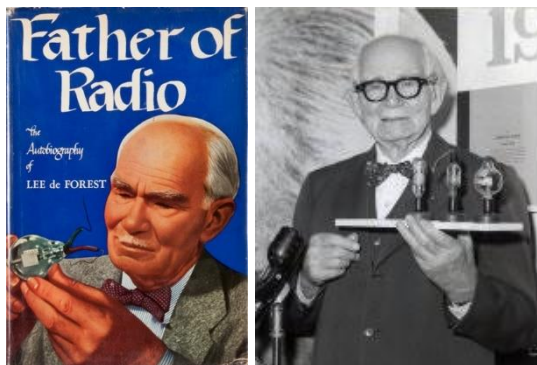


Рис. 1. Обложка книги мемуаров Ли де Фореста «Отец радио». 1950 г. Ли де Форест и его первые аудионные лампы. 1960. Золотой юбилей де Фореста.

Fig. 1. Book cover of Lee de Forest's memoir “The Father of Radio”. 1950. Lee de Forest and his early audion tubes. 1960. De Forest Light's Golden Jubilee

Достижения де Фореста в области радиотехники гораздо шире: он не только изобрел аудион, но и раскрыл его технологический потенциал. Он знал в то время, что аудион является его главным изобретением, которое позже оказалось его «величайшим изобретением» и единственным действительно успешным изобретением; но, несмотря на это, он не мог объяснить его принцип работы. К сожалению, де Форест скоропалительно сделал ошибочный вывод, основываясь на своей предыдущей работе с различными детекторами газов, что остаточный газ внутри аудиона необходим для его функционирования. Он не стал тратить время на то, чтобы разобраться, как именно работает изобретенная им триодная вакуумная лампа.

Полное теоретическое объяснение принципа работы аудиона появилось в 1914 году благодаря усилиям молодого инженера-электрика по имени Эдвин Армстронг [10]. Армстронг, студент Колумбийского университета, подтвердил, что, вопреки первоначальным теориям де Фореста, работа аудиона не зависит от ионизированных газов. Он также продемонстрировал то, что подача части выходного сигнала с анода аудиона обратно на его сетку позволяет не только усиливать сигналы, но и генерировать непрерывные радиоволны, способные передавать человеческий голос.

Де Форест был в восторге от растущего значения аудионов и других электронных ламп в развитии современной электроники, но ему не нравилась идея разделить признание своего изобретения с Армстронгом. В отстаивании своего приоритета в научных разработках он использовал любые методы. Почти все его знаковые открытия и изобретения были связаны с судебными тяжбами, в частности, так произошло с отстаиванием приоритета в открытии принципа положительной обратной связи в ламповом усилителе и даже с изобретением гридлика, сеточного резистора утечки.

Примерно с 1908 по 1920 год несколько человек экспериментировали с фотографической записью звука на пленку. Эти системы имели ограниченный технический успех и коммерческий провал из-за невозможности обеспечить достаточно громкий звук, чтобы его могли слышать несколько человек. Как и в любой сложной системе, заслуга изобретения звукового кино не может быть предоставлена какому-либо человеку. Однако накопленные изобретения Ли Де Фореста, в том числе лампа «Аудион», которая позволяла усиливать электрические сигналы, сыграли ключевую роль в развитии звука как на пленке, так и на дисках. Изобретения де Фореста были усовершенствованы такими компаниями, как *AT&T* и *RCA*. Сам де Форест был первым, кто успешно записал звук на кинопленку на основе изобретенной им технологии, которую он назвал *Phonofilm*.

## 2. Истоки регенеративного радиоприема

Большая часть технологий, изменивших современную жизнь, основана на разработках необычайно творческих людей, многие из которых остаются относительно неизвестными. Открытие положительной обратной связи в ламповом усилителе произошло случайно; интересно, что причастные к этому радиотехники об этом даже не подозревали. Исследование исторических материалов показывает, что в этом открытии ключевой фигурой явился американский радиотехник Пол Уоллес (*Paul E. Wallace*) [11].

Пол Уоллес до 1911 года жил в Рочестере, штат Нью-Йорк. С 1905 года он был заядлым радиолюбителем и использовал аудион по схеме де Фореста. В январе 1910 года он совершил поездку в Нью-Йорк, где посетил радиостанцию де Фореста в Метрополитен Тауэр (*Metropolitan Tower*). Во время этой поездки Уоллес познакомился со специалистом по научному оборудованию О. Т. Луи (*O. T. Louis*) из компании *O. T. Louis Company* (Нью-Йорк). В феврале 1911 года Уоллес переехал в Нью-Йорк. Он арендовал помещение у *O. T. Louis Company* и начал свою деятельность в составе отдела беспроводной связи этой компании. После покупки необходимых деталей у *Murdock Co.* и *Clapp-Eastham Co.* и аудионов у *McCandless* О. Т. Луи начал производить свои радиоприемные устройства. В мае 1911 года Уоллес взял к себе на работу Мерритта Д. Мошера (*Merritt D. Mosher*), который стал разрабатывать вместе с ним радиоприемные устройства.

Первым устройством на аудионе, разработанным летом 1911 г., изготовленным и проданным Уоллесом, был полный приемный комплект *Wallace Valve Receiver Type 1* (ламповый приемник Уоллеса тип 1), рис. 2а. Этот приемник был собран Уоллесом и Мошером и имел кристаллический

и ламповый детекторы. Первый набор «с обычным круглым аудионом» был продан по почте летом 1911 года. Во второй версии этого набора под названием *Wallace Valve Detector* (ламповый детектор Уоллеса) использовался трубчатый аудион.

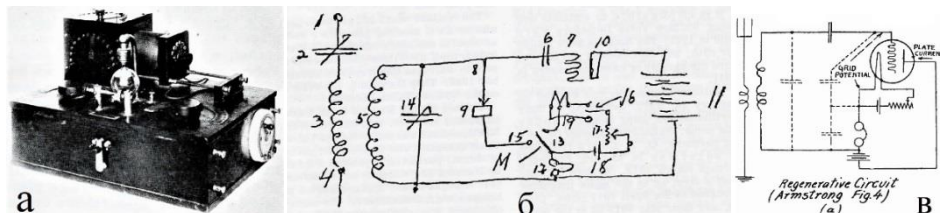


Рис. 2. Ламповый приемник *Wallace* тип 1 на сферическом аудионе производства 1911 г.: а — общий вид, б — принципиальная схема лампового приемника *Wallace* тип 1, нарисованная Полем Уоллесом [11, р. 7], в — схема регенеративного приемника *Wallace* тип 1 с указанием цепи обратной связи.

Fig. 2. Wallace tube receiver type 1 on a spherical audion made in 1911: а – general view, б – circuit diagram of a Wallace type 1 tube receiver drawn by Paul Wallace [11, p. 7], в – diagram of a Wallace type 1 regenerative receiver showing the feedback circuit

Приемник *Wallace Valve Receiver Type 1* был собран по схеме рис. 2б. Приемник *Wallace* работал громче, чем по традиционной схеме из патента де Фореста. Особенностью схемы *Wallace* является то, что колебательный контур (5, 14 на схеме рис. 2б) включен между конденсатором сетки и анодной цепью телефонов. Хотя такая схема и обладает неявно выраженной обратной связью, но все равно небольшая часть выходной энергии попадает на вход приемника, благодаря емкостной связи между телефоном, нитью накала и сеткой (рис. 2в). В этом не последнюю роль играет индуктивность телефонов и длина их соединительных проводов, что и увеличивает громкость звука. Пол Уоллес использовал этот эффект в приемнике своей конструкции по схеме рис. 2б чисто эмпирически. Именно схема согласно рис. 2б послужила Уоллесу в качестве обоснования своего приоритета при оспаривании патента US1113149А Эдвина Армстронга (*Edwin Howard Armstrong*, 18.12.1890—31.01.1954) на регенеративную схему [12]. Схема Уоллеса (рис. 2б) была приведена в патенте Э. Армстронга, рис. 3а.

Следует отметить, что несколько позже (в 1914 г.) де Форест в патенте [13] привел схему приемника *Ultra-Audion*, в котором использовал включение колебательного контура между конденсатором сетки и анодом аудиона, что позволило осуществить регенеративный прием радиосигналов, рис. 3б,в. В *Ultra-Audion* плавное приближение к порогу генерации производилось изменением напряжения накала (реостатом *R*) или анод-

ным напряжением (подключались разные секции анодной батареи), а также в небольших пределах с помощью сеточного конденсатора  $C_2$ .

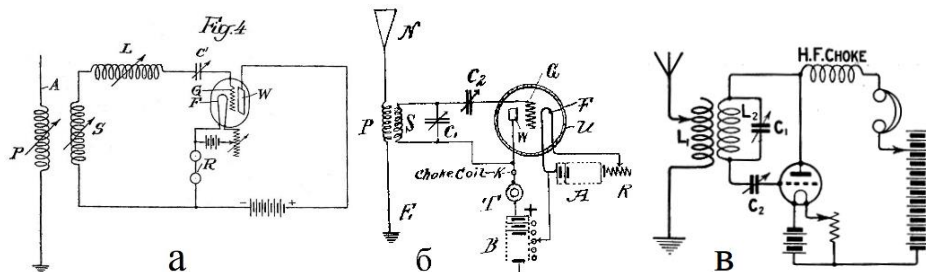


Рис. 3. Схема приемника Поля Уоллеса (а) из патента US1113149A Эдвина Армстронга [12].  
 Схема регенеративного приемника *Ultra-Audion* (б) из патента US1170881A Ли де Фореста [13].  
 Современное условно-графическое исполнение схемы регенеративного приемника  
*Ultra-Audion* (в) Ли де Фореста.

Fig. 3. Paul E. Wallace receiver circuit (a) from Edwin Armstrong's US1113149A patent [12].  
 Diagram of a regenerative *Ultra-Audion* receiver (б) from US1170881A Lee de Forest [13].  
 Modern conditional-graphical execution of the *Ultra-Audion* regenerative receiver circuit (в) by  
 Lee de Forest

Уоллес превратил свое торговое заведение в магазин-салон. Покупатели приходили в магазин чтобы приобрести радиодетали, обсудить проблемы, получить совет, послушать радиоаппаратуру производства Уоллеса и Мошера и научиться ею пользоваться. Летом 1911 года магазин стал местом встреч радиолюбителей. Именно здесь Уоллес познакомился с У. Ф. Коттром (*W. F. Cotter*), Чарльзом Вернером (*Charles Werner*), студентом второго курса колледжа Эдвином Армстронгом и другими энтузиастами. Некоторые из этих друзей приглашались в магазине в комнату 29, где знакомились с новыми разработками Уоллеса и Мошера, а также с их беспроводными экспериментами. В свою очередь, Уоллес и Мошер посещали мастерские этих друзей, в частности, и Армстронга.

В ноябре 1912 года в магазине Уоллеса были организованы прослушивания радиолюбителями по приемнику *Wallace Valve* отправленных по беспроводной телеграфии связи отчетов по результатам выборов Тафта-Уилсона<sup>1</sup> (*Taft-Wilson*).

<sup>1</sup> В 1912 году, когда в США после раскола между Теодором Рузвельтом (*Theodore Roosevelt*) и Уильямом Говардом Тафтом (*William Howard Taft*) появилась Прогрессивная партия, внесшая разброд и шатания в стройные ряды республиканцев, демократ Вудро Уилсон (*Woodrow Wilson*) победил на президентских выборах. Как и его главный соперник, сенатор-республиканец Генри Кэбот Лодж (*Henry Cabot Lodge*), Уилсон имел степень доктора философии, оставшись единственным президентом в истории Соединенных Штатов с такой научной степенью.

С 1911 по 1913 год Уоллес строил свою бизнес империю, в то время как у де Фореста были большие финансовые трудности и проблемы с законом. Летом 1912 г. Ли де Форест в лаборатории Федеральной телеграфной компании (*Federal Telegraph Co.*, сокращенно *FTC*) в Пало-Альто во время экспериментов с усилителем звуковой частоты на двойном аудионе случайно обнаружил эффект обратной связи, но не придал этому значения. Он посчитал это побочным эффектом микрофонного усилителя и поэтому не взял патент на этот эффект. Упоминание обратной связи встречается в его лабораторных записях, датированных 8 июня 1912 г., рис. 4 [14].

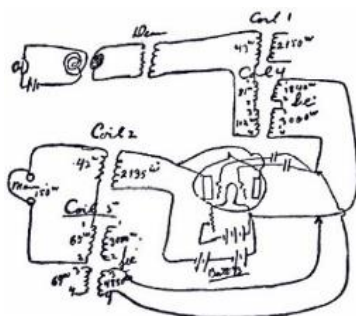


Рис. 4. Ли де Форест дома в Нью-Йорке, 1915 год. Рисунок схемы микрофонного усилителя, сделанный Ли де Форестом в лабораторном журнале. 8 июня 1912 г. [14]

Fig. 4. Lee de Forest at home in New York (1915). A drawing of the microphonous amplifier circuit made by Lee de Forest in a laboratory journal. June 8, 1912 [14]

Считается, что летом 1912 года Эдвин Армстронг разработал новую регенеративную цепь, в которой часть тока с анода возвращалась обратно на сетку для усиления входящих сигналов. Испытываемый радиоприемник с обратной связью в его комнате в Йонкерсе звучал так громко, что вместо наушников можно было использовать громкоговоритель для прослушивания радиопередач. Позже он обнаружил, что при сильной обратной связи лампа генерирует высокочастотные колебания. В этом случае лампа работает в качестве передатчика и излучает электромагнитные волны. Использование положительной обратной связи (также известное как «регенерация») и является прорывным открытием Э. Армстронга.

Армстронг не сразу подал патент на свое изобретение, потому что его отец не дал ему 150 долларов за патентную пошлину. Несмотря на это его дядя посоветовал ему нотариально заверить изобретение. Армстронг последовал совету. Схема, которую он нотариально засвидетельствовал 31 января 1913 года, стала самым ранним документальным доказательством изобретения Армстронга, рис. 5. Он подал заявку на патент 29 октября 1913 года сразу после окончания Колумбийского университета. Патент US1113149A на изобретение под названием «Беспроводная приемная система» Армстронг получил 6 октября 1914 года [15]. В патенте приводится 6 схем приемников прямого усиления с обратной связью, рис. 5.

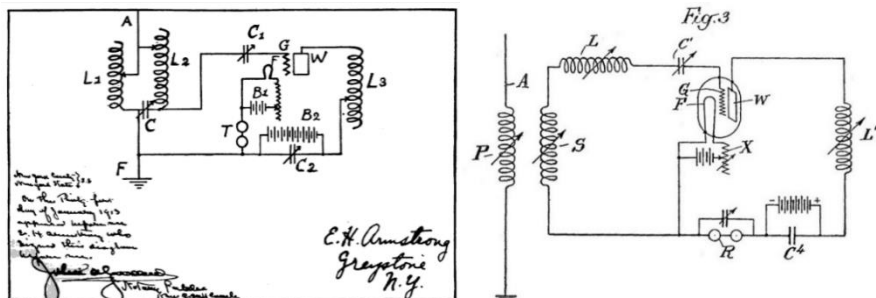


Рис. 5. Регенеративная схема Армстронга (слева), нотариально заверенная 31 января 1913 г. [16]. Одна из принципиальных схем регенеративного приемника (справа) из патента Э. Армстронга US1113149A [15].

Fig. 5. Armstrong Regenerative Circuit notarized January 31, 1913 [16]. One of the schematic diagrams of the regenerative receiver (right) from E. Armstrong's patent US1113149A [15]

### 3. Спор за приоритет открытия положительной обратной связи в ламповом усилителе

Армстронг после получения патента US1113149A 6 октября 1914 г. опубликовал статью в журнале *Electrical World*, в которой подробно описал свои исследования с аудионом. Он объяснил принцип его работы и отметил, что функционирование аудиона как детектора высокочастотных колебаний сильно отличается от его работы как усилителя [10, р. 1150]. В этой статье отмечается: «Аудион хотя и использовался в течение нескольких лет в качестве усилителя и детектора высокочастотных колебаний, но имеющиеся объяснения его действия функционирования являются неудовлетворительными. С этой целью для прояснения некоторых особенностей работы аудиона были получены осциллограммы и сделаны к ним пояснения, которые, по-видимому, ранее не принимались во внимание».

3 марта 1915 г. Армстронг выступил с докладом «Некоторые последние разработки в области аудионного приема» (*Some Recent Developments in the Audion Receiver*) в *Institute of Radio Engineers (IRE)* в Нью-Йорке [17]. В заключении доклада был сделан вывод о проведенных исследованиях, в то время как в статье этого не было сделано. В частности, утверждалось, что для усиления колебаний в сеточном контуре можно использовать два метода: 1. Соединить сеточный контур с анодным контуром и сделать последний таким образом, чтобы радиочастотные токи могли свободно проходить через него; 2. Использовать большую индуктивность в контуре анода и тем самым настраивать его на приходящую частоту (совместно с емкостью между нитью накала и анодом в самом аудионе).

На докладе де Форест не присутствовал, но несмотря на это он принял участие в дискуссии. Он направил свои письменные комментарии Армстронгу [17, р. 239]: «Отсутствие в Нью-Йорке и загруженность делами не позволяют мне уделить внимание докладу г-на Армстронга и принять участие в тщательном обсуждении, которого я заслуживаю. Вкратце, я должен заявить, что мои исследования простого аудионного детектора, аудионного усилителя и детектора “ультра аудиона” для незатухающих волн не полностью подтверждают результаты и выводы, доложенные этим автором... Как я заявил в статье в журнале *Electrical World*<sup>2</sup> от 20 февраля, колебательное свойство аудиона было обнаружено мной несколько лет назад».

Нужно заметить, что кроме Армстронга были и другие претенденты на изобретение регенеративной схемы или ей подобной, которые подали три заявки. Один из них был ученый-инженер из GE Ирвинг Ленгмюр, который известен значительным усовершенствованием вакуумной лампы. Он самостоятельно пришел к регенерации через некоторое время после Армстронга. Ленгмюр подал заявку на патент 29 октября 1913 года, в тот же день, когда Армстронг также подал заявку на аналогичное изобретение. Следующим был немец Александр Мейснер, который 16 марта 1914 года подал заявку на регенеративную схему с газоразрядной лампой. Третьим был де Форест, который подал заявки на два патента, в частности, на ультра-аудион с цепью регенерации в марте 1914 года, но его патент не был принят Патентным ведомством из-за имеющегося патента Армстронга. Поэтому де Форест и другие подали заявку на судебное разбирательство с Патентным ведомством, после чего разбирательство началось для четырех сторон: Армстронга, Фореста, Мейснера и Ленгмюра.

Изобретение Армстронга привело к почти 20-летней юридической битве за патентные права. В период между 1914 и 1934 годами он и де Форест боролись в суде как индивидуально, так и через корпорации (*Westinghouse Electric & Manufacturing Company* и *American Telephone and Telegraph*), которые приобрели права на свои патенты. Длинная и сложная битва началась, когда Ли де Форест сидел в аудитории и слушал одну из лекций Армстронга о передающих и приемных свойствах своей регенеративной схемы. Несмотря на то, что в 1913 году де Форест прочитал лекции об особенностях своего экспериментального изобретения, он никогда не утверждал, что обращал внимание на какие-либо эффекты, подобные тем, что обнаружил Армстронг. После первого решения суда, в котором было заявлено, что доктор де Форест изготовил первый генератор на вакуумной

---

<sup>2</sup> Forest Lee de. The Ultraudion Detector for Undamped Waves // *Electrical World*. February 20, 1915. Vol 65. No. 8. P.465-466.



лампе, были отклонены претензии доктора Ленгмюра, а затем, за короткое время, были сняты претензии господина Мейснера по причине поздней даты подачи заявки в Патентное ведомство. Это сузило судебные сражения до требований Армстронга и Ли де Фореста.

В 1914 году Ли де Форест продолжил подавать иски, но суды в начале разбирательства в качестве патентообладателя на следующие десять лет поддержали Армстронга, чей патент на схемы регенеративного приемника был выдан в 1914 г. В результате многолетнего судебного разбирательства судья Майер в 1921 г. признал, что патент «обратной связи» Армстронга, контролируемый *Westinghouse Electric & Manufacturing Company*, является действительным [18]: «Достоинство изобретения вскоре было признано, и аппарат, который стал изобретением Армстронга, впоследствии был использован в коммерческих целях вскоре после начала войны в 1914 году в Сейвилле, Лонг-Айленд, а также для преодоления трудностей с приемом сигналов из Науэна (Германия)». Коммерческая ценность изобретения Армстронга была оценена на раннем этапе, и лицензии были получены от *Atlantic Communication Company*, *Goldschmidt Company* и *Marconi Company* в 1914 и 1916 годах. В этот период времени профессор М. И. Пупин из Колумбийского университета отметил: «Вклад Эдвина Х. Армстронга в радиотехнику — эпохальный. Тот, кто использовал его обратную связь, не может не оценить его выдающуюся ценность и неисчерпаемые возможности... Регенеративный приемник и регенеративный генератор всегда будут фигурировать среди классических изобретений и будут занимать ведущее место в исследовательских лабораториях мира, а также в коммерческой беспроводной сети. Это дает Армстронгу право на очень высокое место среди изобретателей электротехники» [19].

Несмотря на такие восторженные отзывы об изобретении Армстронга его судебный спор с Ли де Форестом продолжился. Длительный двадцатилетний спор и извилистый путь тяжбы проходил через процессы подачи апелляций и в конечном итоге дошел до Верховного суда США. В 1934 году, через два десятилетия, Верховный суд постановил, что на основании записи в лабораторном журнале 1912 года (рис. 4) де Форест действительно создал регенеративную цепь раньше, чем Армстронг, даже если он в то время не осознавал ее значения и не подавал заявку на патент. Суд вынес решение в пользу де Фореста, хотя эксперты согласились с тем, что это решение было неверным. Де Форест был обрадован выводами Верховного суда, в то время как электротехническое сообщество отнеслось к этому отрицательно.

Такая яростная борьба была связана с тем, что в то время, когда был изобретен регенеративный приемник, вакуумные лампы были очень доро-

гими и потребляли много энергии, что требовало дополнительных финансовых расходов на приобретение громоздких батарей или трансформатора переменного тока с выпрямителем. Помимо этого, было немедленно осознано коммерческое значение регенеративной схемы, которая позволила принимать трансатлантические сигналы в центре города Нью-Йорк с помощью относительно небольших антенн, что до этого было невозможно. Регенеративные приемники по бывшим патентам Армстронга производили 17 компаний. Таким образом, регенеративный приемник имел большие преимущества, которые реализовывались при наличии в схеме только одной лампы, что позволяло удовлетворять потребности быстро растущего числа радиослушателей.

Независимо от решения Верховного суда инженерное сообщество стало на сторону Армстронга и продолжало считать его законным автором регенеративного радиоприемника, а впоследствии и других изобретений. В связи с этим ему было присуждено несколько наград. В 1917 году Институт радиотехники (*IRE*) присудил ему свою Почетную медаль, а в 1942 году Американский институт инженеров-электриков (*AIEE*) наградил его медалью Эдисона, высшей наградой Института (в 1963 году *IRE* и *AIEE* объединились и сформировали *IEEE* — Институт инженеров по электротехнике и электронике). Эти престижные награды до сего дня не потеряли своей ценности.

#### 4. Изобретение гридлика

Нестабильность работы аудиона в качестве детектора была в первую очередь связана с несовершенством схем его включения. Сигнал с входного контура поступал на сетку аудиона в одних схемах через конденсатор, в других — напрямую. В конце концов из-за накопления отрицательных зарядов на сетке аудион запирался, что приводило к нарушению протекания процесса детектирования. В этом случае для исправления ситуации приходиться повышать анодное напряжение, что не могло продолжаться бесконечно.

В 1914 году Ли де Форест, работая с передатчиком в *Metropolitan Tower*, пришел к выводу, что для предотвращения слишком большого нарастания отрицательного потенциала на сетке аудиона необходимо включить между сеткой и нитью накала резистор  $R_g$  с большим сопротивлением (несколько единиц мегаом), рис. 6. Этот резистор получил название гридлик (англ. *grid leak* — утечка сетки). Благодаря гридлику электроны медленно стекали к нити накала, предотвращая тем самым появление чрезмерного отрицательного заряда сетки.

Первая «утечка сетки» (гридлик, он подключил между сеткой аудиона и его нитью накала), была разработана де Форестом все в той же комнате, где находился передатчик *Metropolitan Tower*. Высокоомный резистор представлял собой полоску бумаги, покрытую карандашным графитом, которая крепилась на поверхности куска твердой резины между двумя небольшими крепежными контактами для включения в схему. Де Форест вспоминал: «Вскоре мы начали продавать это простое устройство, первый из современных компонентов с «нарисованной схемой», нашим «местным» клиентам. Эта доказанная ранняя дата утечки позволила мне позже аннулировать на ее основе патент Ричардса (*Richards W. L.*) из AT&T» [9, р. 247].

Утечка сетки часто представляла собой просто карандашную линию, проведенную по корпусу конденсатора от одной его клеммы к другой, которую можно было исправить с помощью ластика! Ток следует по этим линиям и, таким образом, освобождает сетку от блокирующего заряда.

Экспериментаторы пытались оптимизировать значение утечки сетки и часто делались коммерческие версии, состоящие, например, в заключении листа бумаги с углеродным покрытием в стеклянную трубку с металлическими концами.

К концу 1920-х годов использовалось множество различных методов изготовления гридликов. Среди этих конструкций были: тонкие стеклянные стержни, покрытые углеродом; углерод, нанесенный на внутреннюю часть стеклянных трубок; угольные стержни и старый запас бумажных полосок, пропитанных тушью и удерживаемых металлическими зажимами, рис. 7. Ни одна из этих конструкций не отличалась хорошей работой или длительным сроком эксплуатации.

Де Форест обнаружил, что «высокое и желательно неиндуктивное сопротивление» между сеткой и нитью накала значительно увеличивает энергию генерируемых колебаний, например, с микроватта до десятков или сотен ватт. Он также установил, что еще большее увеличение энергии колебаний достигается, если параллельно сопротивлению подключить небольшую емкость [9, р. 316]. На рис. 8 показана схема соединения резистора  $R$  и конденсатора  $C$ , который на самом деле является дроссельным конденсатором, управляющим обратной связью. Гридлик часто прикрепляли к зажимам сеточного конденсатора с целью простоты его замены.

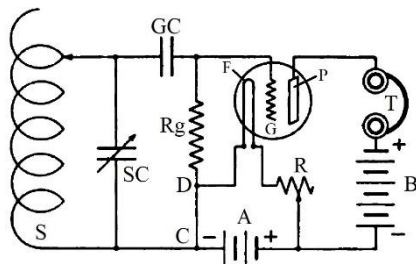


Рис. 6. Принципиальная схема радиоприемника на аудионе с гридликом  $R_g$ .

Fig. 6. Schematic diagram of a radio receiver on an audion with an  $R_g$  grid leak

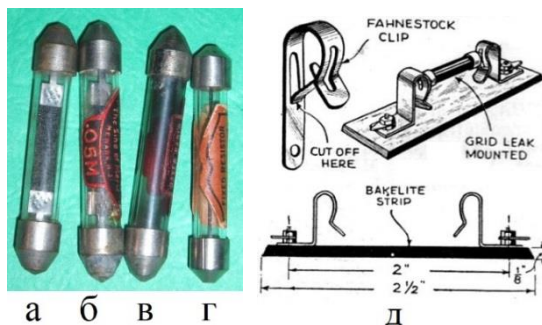


Рис. 7. Типичные утечки сетки: а, б — с пропитанными бумажными элементами, в — с внутренним покрытием, г — с покрытием внутренней поверхности стеклянной трубки и д — устройство монтажа гридлика.

Fig. 7. Typical grid leaks: a, б — with impregnated paper elements, в — with an internal coating, г — with a coating of the inner surface of the glass tube, and д — a grid mount device

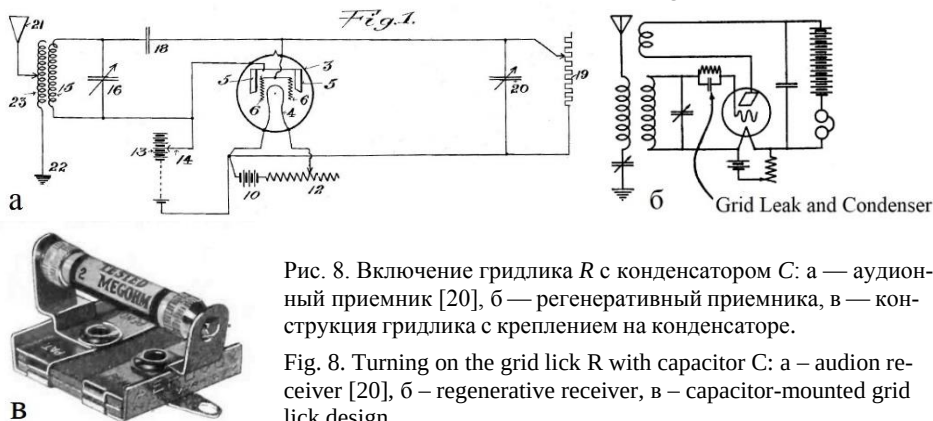


Рис. 8. Включение гридлика R с конденсатором C: а — аудионный приемник [20], б — регенеративный приемника, в — конструкция гридлика с креплением на конденсаторе.

Fig. 8. Turning on the grid lick R with capacitor C: а — audion receiver [20], б — regenerative receiver, в — capacitor-mounted grid lick design

Отметим, что в 20-е годы XX века выпускались промышленные образцы различных видов регулируемой утечки сетки, в частности, американской *De Luxe Bretwood Company* выпускались регулируемые гридлики. Сопротивление гридлика этой компании изменялось вращением винта, что обеспечивало очень точную регулировку. О важности регулировки гридлика в рекламе<sup>3</sup> 1927 г. сообщалось следующее «Когда вы танцуете под радиомызыку, вам часто хочется, чтобы ваш приемник звучал немного громче. Требование дополнительной громкости от приемника связано с удаленностью танцующих, которые своими комплиментами и шарканьем ног заглушают музыку. Проблема решается использованием переменной утечки сетки модели *De Luxe Bretwood Variable Grid Leak*. Поверните ручку на максимальное сопротивление, и танцевальная громкость по желанию увеличится на 25 процентов. Кроме того, таким образом, у вас есть удобный комбинированный регулятор громкости и регулятор чувствительности. Модель *De Luxe*

<sup>3</sup> Dancing Volume But No Extra Tubes! // Radio World. July 16, 1927. Vol. 11. No. 17. P. 23.

может быть установлена на передней панели радиоприемника или любом другом удобном месте на его корпусе.

Гридлик, изобретенный Ли де Форестом, стал важным элементом в радиоустройствах (подобно предохранительному клапану в паровом двигателе). Его можно назвать своеобразным «сердцем радио», так как он помогает контролировать поток электронов в цепи.

Ламповые детекторы с утечкой сетки широко использовались в 1920-е годы XX века в батарейных многодиапазонных радиоприемниках. В этих радиоприемниках применялись триоды с низким коэффициентом усиления и катодами прямого накала. Примерами такого типа радиоприемников являются модели *Zenith* 11, 12 и 14 выпуска 1927 года. Популярность схемы на триоде с утечкой сетки заключалась в том, что она не только обеспечивала демодуляцию радиосигнала, но также усиливала аудио сигнал, в отличие от классического вакуумного диода и кристаллического детектора.

## 5. Последние промышленные конструкции аудионов Ли де Фореста

Начало 20-х годов XX века было для интересов де Фореста периодом потрясений и разочарования. Казавшиеся бесконечными судебные процессы и тяжбы по патентам истощали ресурсы компании и отнимали время у ее сотрудников. RCA контролировала патенты Флеминга и получила судебный запрет, который не позволял де Форесту продавать вакуумные триоды. Сам Ли де Форест участвовал в разработке *Phonovision* (звуковых фильмов) и не принимал активного участия в делах *De Forest Radio Telephone and Telegraph Company*.

Срок действия патента Флеминга истек в ноябре 1922 года, что открыло де Форесту путь к возобновлению производства аудионов. Следует отметить, что к началу 1923 года де Форест продал свою долю в *Radio Telephone and Telegraph Company*.

Первыми рекламируемыми лампами были DV-1 и DV-6, впервые опубликованные в каталоге *De Forest* в начале 1923 года. Реклама ламп DV в крупных радиожурналах появилась в сентябре 1923 года. Внешний вид ламп DV-1, DV-6A и DV-2 приведен на рис. 9. На цоколе этих ламп наносилась маркировка *De Forest AUDION* и номера патентов вместе с ограничительным примечанием. Лампы были геттерированы и имели маленькие круглые оранжево-черные наклейки с номером типа. Электрические характеристики ламп были аналогичны лампе UV199.



Рис. 9. Радиолампы серии *DV* производства *De Forest Radio Telephone and Telegraph Company*: 1. *DV-1*, 2. *DV-6*, 3. Устройство *DV-6*, 4. Упаковка *DV-6*, 5. *DV-6A*, 6. *DV-2* и ее упаковка. 1923 г. [21].

Fig. 9. *DV* series radio tubes manufactured by *De Forest Radio Telephone and Telegraph Company*: 1. *DV-1*, 2. *DV-6*, 3. *DV-6* device, 4. *DV-6* packaging, 5. *DV-6A*, 6. *DV-2* and its packaging. 1923 [21]

Вакуумные триоды серии *DV* имели коэффициент усиления 9,7 и предназначались для усилительных и детекторных каскадов радиоприемников. Лампы имели цоколь типа *UV* [22] с никелированным покрытием *Shaw*<sup>4</sup> и 4 короткими контактными штырьками (в маркировке на это указывала буква *V*). Лампа *DV-1* предназначалась для замены трубки *RCA WD11* в переносной радиоаппаратуре с питанием от гальванических батарей. Она представляла собой миниатюрный триод (35 × 39 мм) с платиновой нитью накала, покрытой оксидом. Для питания ее нити накала требовался источник питания с напряжением 1—1,5 В с током 0,2 А. В колбе лампы *DV-1* анод, сетка и нить накала располагались вертикально.

В лампе *DV-6* вольфрамовая нить накала была торирована и рассчитана на напряжение 3—5 В при токе 0,5 А. В лампе использовалось горизонтальное расположение цилиндрических электродов. Ее конструкция была аналогична европейскому типу *R*. Габариты *DV-6* составляли 35 × 80 мм. Показанная на рис. 9 *DV-6A* была улучшенной версией более ранней *DV-6*. Основная структура была примерно такой же, но использовалась торированная нить накала, которая позволяла вдвое уменьшить ток

<sup>4</sup> *General Electric Company* с 1918 года использовала цоколи радиоламп производства *Shaw Insulator Company*. Эти ламповые цоколи стали известны как *Shaw Standard Base*, а в некоторых опубликованных статьях упоминаются как цоколи *Navy*.

накала. Лампа была геттерирована и внесена в каталог как *Universal Tube DV-2* (рис. 9) была новым дополнением к серии и имела напряжение нити накаливания 5 В при токе 0,25 А.

В апреле 1924 года новая реклама показала серьезные изменения в серии ламп. Использование металлических цоколей было прекращено в пользу новых материалов. *DV-1* и *DV-6A* были исключены, а *DV-3* добавлена. *DV-6A* с ее большим током накала и низкой крутизной не могла конкурировать с лампами типа «99» и «01A» и поэтому из-за плохих продаж была снята с производства.

Детектор/усилитель триод *DV-1* производился недолго и в апреле 1924 г. был заменен на *DV-3*, который имел почти идентичные характеристики. Лампа *DV-3* имела небольшую высоту и горизонтальную структуру элементов, в отличие от более высокой лампы и вертикальной конструкции *DV-1*. В первых *DV-3* использовалась бакелитовый цоколь, цвет которого варьировался от темно-бордового до темно-коричневого. *DV-3* производился с бакелитовым цоколем примерно с апреля 1924 г. до конца 1925 г.

В 1926 году компания представила новую серию ламп *DL*. Лампы *DL* имели длинные контактные штырьки и новый на тот момент цоколь *UX*. Четыре лампы *DL* появились в 1926 году, но только одна была действительно новой конструкции. Этой новой лампой была *DL-4*, предназначенная для использования в качестве ВЧ-усилителя. Эти лампы были идентичны своим аналогам *DV*, за исключением цоколя. В 1926 году эти типы ламп были сделаны с черным бакелитовым цоколем, но к 1927 году его заменили на изолянтит (англ. *Isolantite*).

В 1927 году на рынок были выпущены последние четыре лампы серии *DL*. Лампа *DL-3* представляла аналог *DV-3*, но с цоколем *UX*, а все остальные типы были новой конструкции. Лампы *DV-DL* были сняты с производства в 1928 году с появлением серии *D400*. В этой новой серии использовались стандартные отраслевые номера (например, *D400A*) и цоколи из изолянтита.

В 1928 году появилась реклама новой серии аудионов Ли де Фореста, рис. 10. Объектом рекламы стал универсальный вакуумный триод типа 427, который имел подогреваемый катод, а его нить накала питалась переменным током. Интересен текст рекламы (рис. 10). Приведем небольшой фрагмент из него: «Снова говорит авторитетный голос — де Форест. Доктор Ли де Форест, чье имя почитается как отец радио, внес свой последний и самый важный вклад в радио, поскольку из лаборатории этого выдающегося ученого в области радио появилось еще одно выдающееся радиодостижение — новые усовершенствованные аудионы *De Forest*... Их превосходная четкость и громкость, а также более длительный срок службы (1000 часов гарантируется с типом А. С. 27) дадут вам новую концепцию радиоразвлечений».

В конце текста рекламного плаката звучит обращение к радиослушателям: «Настройтесь на первую программу *De Forest Broadcast* по общенациональной радиовещательной системе *Columbia* — в воскресенье вечером, 16 сентября, с 22:00 до 22:30 по восточному летнему времени, и послушайте двух великих пионеров авиации: командира Ричарда Э. Бёрда, и доктора Ли де Фореста. Посетите выставку *De Forest* — помещение L-5, главный этаж — на Всемирной выставке *Radio World* в Мэдисон-Сквер-Гарден, с 17 по 22 сентября, и оцените первый показ новых усовершенствованных аудионов *De Forest*».

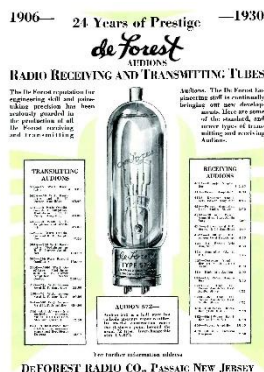


Рис. 10. Реклама новых типов аудионов де Фореста. 1928 г. Справа реклама радиоламп производства *DeForest Radio Co.* в журнале *Electronics* 1930 г.

Fig. 10. Advertising of new types of de Forest audions. 1928. On the right is an advertisement for radio tubes manufactured by *DeForest Radio Co.* in *Electronics* magazine. 1930

Одна из последних реклам радиоприемных и передающих аудионов *DeForest Radio Co.* была помещена в 1930 г. в журнале *Electronics*, рис. 10. Реклама проводилась под девизом «24 года престижа 1906—1930 гг.»: «Репутация *De Forest* в области инженерного мастерства и кропотливой точности ревностно охраняется при производстве всех принимающих и передающих аудионов *De Forest*. Персонал *De Forest Engineering* постоянно работает над новыми разработками. Вот некоторые из стандартных и новых типов аудионов передачи и приема». В дальнейшем аудионы де Фореста производила *RCA Radiotron Company*.

## 6. Звуковое кино

Быть первопроходцем всегда было для Ли де Фореста навязчивой идеей. Возможно, стремление исследовать новые области было наследием колониальных предков. Исчезнувшие географические границы по-прежнему оставляли для исследования гораздо более обширные области науки и техники. Ли де Фореста непреодолимо стала манить область радиотелефонии, когда ранняя беспроводная связь стала несколько тесновата для него. Радиотелефония тогда едва ли была мечтой даже среди инжене-



ров связи. Ли де Форест был изобретателем одиночкой, он любил творить вне коллектива. Примитивное начало радиовещания в 1907 году логически обусловило необходимость разработки электронного усилителя на основе детекторной лампы *Audion* и таким образом ему снова удалось избежать коллективного творчества. А когда в 1912 году этот новый усилитель оказался еще и генератором, то для научных исследований открылся бескрайний океан с заманчивыми архипелагами практического применения.

В тот момент стало очевидно, что многие забытые мечты других ранних изобретателей могут наконец воплотиться в жизнь. Среди них в мире телевидения были сканирующий диск Нипкова, электронно-лучевое изображение Розинга (*Rossing*), изобретение Кэмпбеллом-Суинтоном (*Campbell-Swinton*) катодного сканирующего луча (позднее усовершенствованное в «иконоскопе» Зворыкина) — все эти гениальные концепции, оставшиеся только в виде чертежей и патентов, не были реализованы из-за простого отсутствия безынерционного усилителя с мощностью усиления в миллиард раз.

Область говорящего кино или фонофильм (*Phonofilm*) непреодолимо манила Ли де Фореста. Это та область, в которую он мог войти почти без посторонней помощи. Ли де Форест говорил [9, р. 359]: «Возможно, единственным соображением, которое больше, чем какое-либо другое, побудило меня заняться этой областью, было мое личное желание разработать новое и полезное применение аудионного усилителя — такое, которое я мог бы разработать в значительной степени своими собственными усилиями, в отличие от его применения к междугородной телефонной связи, где, очевидно, были необходимы интенсивные усилия большого корпуса инженеров, поддерживаемые гигантской деловой организацией. Еще одним мотивом было мое желание увидеть фонографический аппарат, который был бы свободен от многих присущих дисковому аппарату недостатков, в частности, короткой длины записи, необходимости часто менять иглы и веры в то, что с помощью светового карандаша, а не стальной иглы, можно было бы полностью избавиться от поверхностной царапины иглы, которая всегда была неотделима от существующих типов фонографов».

Интерес к новой, очень практичной области изобретения, столь радикально отличающейся от радио, вызвал заметное возрождение изобретательности Ли де Фореста. Она несколько застопорилось с тех пор как увлекшая его ранняя область радиосвязи оказалась переполненной энергичными инженерами из великих известных корпораций *Western Electric*, *General Electric*, *Westinghouse Electric* и учреждений, которые с парази-

тельным безразличием наблюдали в 1907—1917 гг. за прогрессом, достигнутым в области радиосвязи.

Для первопроходца Ли де Фореста пришло время искать новые рубежи, и он решил включить голос и музыку в длинный немой фильм, взять шум из студии и перенести его в кинотеатр! В новой области техники его изобретательность вспыхнула с новой силой. Многое предстояло сделать, и он радовался новым поставленным задачам [9, р. 359].

Де Форест в сентябре 1919 года первым запатентовал технологию «звук на пленке» (*sound-on-film*) [23]. По этой технологии звуковые колебания преобразуются в интенсивность света, излучаемого источником, и «фотографируются» на пленку. Технология *Sound-on-film*, разработанная Форестом, полностью устраняла проблемы с синхронизацией звука благодаря встроенному саундтреку к фильму в сам фильм. Каждый кадр фильма содержал точную информацию об изображении и звуке того, что происходило в кадре. Это позволяло поддерживать идеальную синхронизацию звука и изображения даже при повреждении пленки, когда кадры приходилось удалять. Де Форест назвал звуковой кинофильм, созданный по его технологии, *Sound-on-film*. Конкурентные системы той эпохи, такие как *Vitaphone* (все еще находившиеся в разработке в 1919 году), были в основном устройствами «звук на диске», которые, по сути, были вариантами проекционного *Kinetophone* Эдисона.

*Sound-on-film*, как следует из названия, представляет собой комбинацию на одной и той же стандартной кинематографической пленке изображения с голосом или музыкой, записанной фотографически. Звуковая запись переменной оптической плотности занимает очень узкую полосу на краю пленки шириной около  $3/32$  дюйма (2,38 мм) и не уменьшает существенно ширину изображения. Схема записи (Fig. 1) и воспроизведения звука (Fig. 2) по системе Ли де Фореста изображены на рис. 11.

В течение следующих четырех лет он совершенствовал свою систему с помощью материалов и патентов, полученных по лицензии от Теодора Кейса (*Theodore Case*, 1889—1944). В 1916 году Кейс вместе с Эрлом Спонецблом (*Earl Sponable*, 1895—1977) работал с комбинациями редкоземельных элементов и инертных газов для создания светящейся лампы под названием *Aeo Light*. Световые импульсы концентрировались через щель на пленку и регистрировались в виде линий черного или серого цвета.

Первый говорящий фильм де Форест снял в 1921 году. Изобретатель записал в своем дневнике за 9 июля того же года: «Сегодня я сделал свое первое “говорящее кино” — самого себя, очень горячего и несколько взволнованного; говорили слишком громко, а фотография была плохой из-

за белого “задника” и плохого расположения света. Но в конце концов, несмотря на все сглазы и обманы, — с опозданием на два месяца и после двух лет напряженной работы — явился явным обещанием грядущих великих свершений» [9, р. 361].

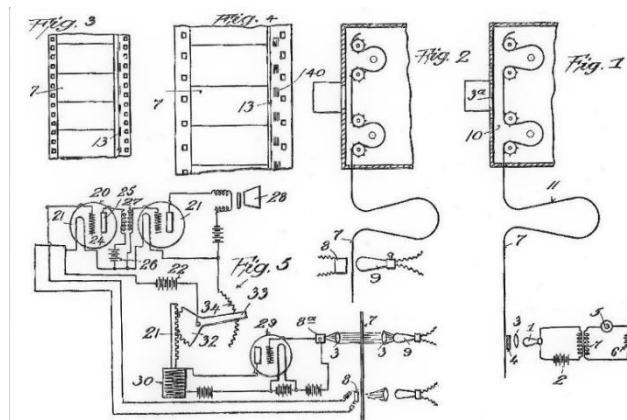


Рис. 11. Первый из множества патентов Ли де Фореста на систему *Sound-on-film*. Рисунок из патента US1446246A с приоритетом от 18 сентября 1919 г. [23].

Fig. 11. The first of Lee de Forest's many patents for the *Sound-on-film* system. Drawings from US1446246A patent, September 18, 1919. [23]

9 июня 1922 года он впервые продемонстрировал оптический звуковой фильм<sup>5</sup> членам Американского института инженеров-электриков. В ноябре 1922 года де Форест организовал *De Forest Phonofilm Corporation*. Родственной организацией, основанной в то же время, была *De Forest Patent Holding Company*, которая контролировала все его патенты в области звукозаписи и воспроизведения (более 70 патентов). Производство фонофильмов началось в старой студии Талмаджа («эта древняя реконструированная пивоварня *Tec-Art*», как назвал ее де Форест) на Восточной Сорок восьмой улице в Нью-Йорке. Оператором был Гарри Оуэнс (*Harry Owens*), которого Хьюго Ризенфельд<sup>6</sup> прислал на помощь де Форесту. В период расцвета студии (1923—1925) выпускалось несколько короткометражных фонофильмов в неделю — процедура, которая предвосхитила регулярное производство короткометражек *Vitaphone* компанией *Warner Bros.*, начиная с 1926 года.

<sup>5</sup> В СССР системы звукового кино с фотографической записью звука начали разрабатываться в 1926 г. в Москве П. Г. Тагером (система «Тагелефон») и в 1927 г. в Ленинграде А. Ф. Шориным. Фонограмма Шорина имела переменную ширину дорожки записи, а в «Тагелефоне» — переменную оптическую плотность. Первая кинопрограмма с записью звука по системе Шорина была показана в 1929 году. Первый советский полнометражный художественный фильм с записью звука по системе «Тагелефон» — «Путевка в жизнь» вышел в 1931 г.

<sup>6</sup> Хьюго Ризенфельд (*Hugo Riesenfeld*, 26.01.1879—10.09.1939) — американский композитор австрийского происхождения. Как кинорежиссер писал свои собственные оркестровые композиции для немых и звуковых фильмов. За свою карьеру написал около 100 саундтреков к фильмам.

В 1923 году Ли де Форест использовал систему Кейса для записи звука на киноплёнку под названием *Phonofilm*, рис. 12. Предварительный просмотр публичной премьеры *Phonofilm* состоялся 12 апреля 1923 года перед Нью-Йоркским электрическим обществом в зале здания Инженерных обществ. Переполненная публика увидела короткие фонофильмы Генри Касса (*Henry Cass*), описывающего работу системы де Форест, Эдди Кантора (*Eddie Cantor*), поющего «Чем молчаливее они становятся, тем больше они мне нравятся» (*The dumber they come the better I like 'em*) и «О, боже, Джорджи» (*Oh Gee Georgie*), и Лилиан Пауэлл (*Lillian Powell*), исполняющую танец мыльных пузырей под звуки музыки мелодии Брамса. Де Форест отметил в своей автобиографии: «Другие номера, изысканно красивые или бесшабашные комедии, следовали в непрерывной последовательности» [9, р. 370]. *Phonofilm* был запущен публично в театрах Ривальто и Риволи через три дня после предварительного просмотра. Его первоначальный успех привел к показу программ *Phonofilm* не менее чем в тридцати четырех кинотеатрах на Восточном побережье в период с 1923 по 1925 год, а также в Канаде, Южной Америке, Великобритании, Южной Африке, Австралии и Японии.

После премьеры *Phonofilm* в 1923 году де Форест и Ризенфельд сидели и ждали больших предложений из Голливуда. Могут ли студии быть глухи к чуду звука? Могли ли они отказаться от возможности, предоставленной мечтой, которую теперь осуществил де Форест? Де Фореста ждало мрачное пробуждение. Спустя годы изобретатель с горечью размышлял, «какие каменные стены равнодушия, глупости и сплошного негатива мы раскопали среди мертвых костей и бетонных черепов киномагнатов!» [9, р. 370]. Ни один голливудский руководитель не проявлял серьезного интереса к предприятию де Фореста. В 1923 году киномагнат Карл Леммле (*Carl Laemmle*), один из руководителей студии, приглашенных на презентацию звуковых фильмов де Фореста, прислал помощника, чей энтузиазм по поводу увиденного и услышанного тут же был подавлен другими руководителями *Universal*. Адольф Зукордид (*Adolph Zukordid*) нашел время, чтобы посмотреть программу де Фореста, но он все еще помнил провал предприятия Эдисона с *Kinetophone* в 1913 году, и поэтому решил не тратить свои деньги на еще одно сумасшедшее изобретение без будущего [9, р. 371].

С помощью системы *Phonofilm* было создано более 200 короткометражных фильмов, в том числе шестиминутная речь губернатора Нью-Йорка Альфреда Э. Смита (*Alfred E. Smith*) для его кампании по выдвижению кандидатом в президенты в 1924 году. Это было первое применение звукового фильма в политике.



Рис. 12 Ли Де Форест позирует на фотографии 1922 года с полосой своего Фонофильма со звуком на пленке. Фонофильм де Фореста содержит изображение и голос Франклина Д. Рузвельта, выдвигающего имя А. Смита на Национальном съезде Демократической партии 1924 года. На поле кинокадров (в центре и справа) на левой их части видна дорожка звуковой записи переменной плотности в виде прямых горизонтальных линий [24].

Fig. 12. Lee De Forest poses in a 1922 photo with a strip of his Phonofilm sound-on-film. De Forest's Phonofilm documents the sight and sound of Franklin D. Roosevelt placing Al Smith's name into nomination at the 1924 Democratic National Convention. In the field of film frames (in the center and on the right), on the left side of them, a variable-density sound recording track is visible in the form of straight horizontal lines [24]

Технология *Phonofilm* де Фореста вскоре не выдержала конкуренции. Тем не менее, в 1959 году Академия кинематографических искусств и наук (*Academy of Motion Picture Arts and Sciences*) наградила его почетным «Оскаром» за «его новаторское изобретение, принесшее звук в движущиеся изображения» (англ. *his Pioneer Invention which brought Sound to the Motion Picture*) и установила звезду на Голливудской аллее славы, рис. 13.

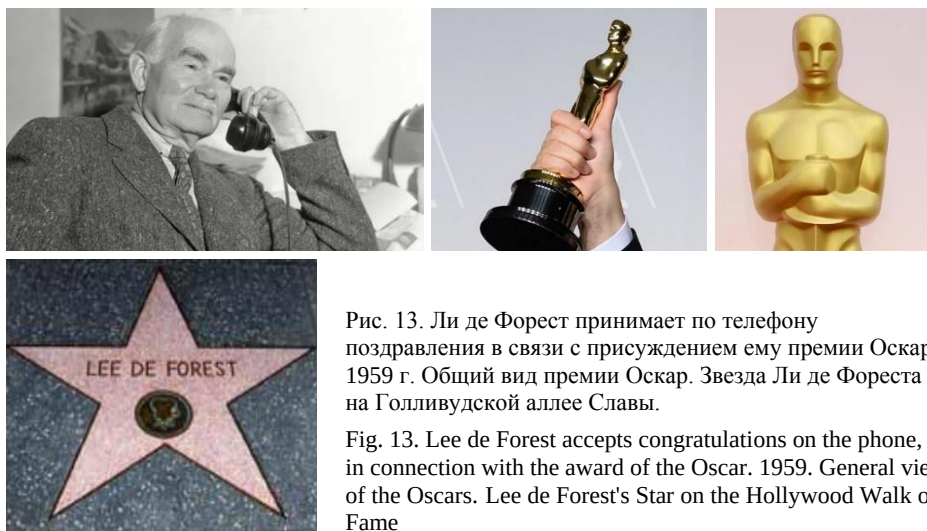


Рис. 13. Ли де Форест принимает по телефону поздравления в связи с присуждением ему премии Оскар. 1959 г. Общий вид премии Оскар. Звезда Ли де Фореста на Голливудской аллее Славы.

Fig. 13. Lee de Forest accepts congratulations on the phone, in connection with the award of the Oscar. 1959. General view of the Oscars. Lee de Forest's Star on the Hollywood Walk of Fame

На 30-й встрече выпускников колледжей в 1926 году Йельский университет наградил де Фореста почетной степенью доктора наук. В приветствии по этому поводу отмечено: «Доктор Де Форест - один из выдающихся магов в романтической области современной науки; он помог сделать нынешний век преимущественно веком чудес» (англ. Dr. De Forest is one of the foremost magicians in the romantic domain of modern science; he has helped to make the present age preeminently the age of miracles).

## 7. Четвертая жена

В 1930 году Ли де Форест, будучи президентом Института радиоинженеров, выступил в Торонто на Канадском съезде. После выступления он был приглашен его дальней родственницей киноактрисой Бебе Дэниелс (*Bebe Daniels*) к ней домой на вечеринку. Во время плавания с гостями на серфинге на волнах де Форест познакомился очаровательной девушкой. Ею оказалась звезда немого кинематографа киноактриса Мари Москини (англ. *Marie Mosquini*, 03.12.1899—21.02.1983). Короткое знакомство быстро переросло в любовь. Через шесть недель произошла их свадьба в Нижней Калифорнии. Его друг, Джон Стоун Стоун, по доверенности был шафером. Некоторое время он оставался в Сан-Диего и тепло благословил этот брак.

В октябре 1930 года газеты писали об этом союзе: «Звон свадебных колоколов, и орган играет «*O Promise Me*». В день свадьбы Ли де Форесту было 57 лет, а его невесте Мари Москини — 31 год. Заголовок в газете *Los Angeles Times* гласил: «Брак де Фореста подтверждается». По всей видимости, это был секрет Голливуда: «Ходившие в Голливуде слухи о том, что доктор Ли де Форест, известный изобретатель, а также известный как “отец радио”, и киноактриса Мари Москини, тайно поженились в Тиа Хуане (*Tia Juana*). Об этом вчера подтвердили сообщения из приграничного города». [25]. Его последний брак со Мари Москини продлился с 1930 года до самой его смерти в 1961 году, рис. 14.

По словам де Фореста: «Этот брак был благословенным. Ибо с того октябрьского дня 1930 года мы с Мари доказали всем знакомым и всему миру, что внезапный брак может длиться всю жизнь и счастье на протяжении всей жизни. Поэтому я искренне призываю следовать избитому, но хорошо зарекомендовавшему себя девизу: “Если сначала и т. д... пробуй, пробуй еще раз!”» [9, p. 409].

Ли де Форест был счастлив как никогда: «Всегда вместе, неразлучные спутники, наша супружеская жизнь не оставляла желать лучшего — за исключением того, что ни один ребенок не благословил наш союз. Вне



Рис. 14. Мари Москини (1930 г.). Ли де Форест и Роберт Милликен в помещении офиса де Фореста в Калифорнии (август 1952 г.). Ли и Мари де Форест позируют на танцполе (1950-е...1960-е гг.). Вручение мемориальной премии доктора Ли де Фореста. Слева направо: Мари де Форест, неизвестная молодая женщина, и Меррилл Свон (1960-е гг.) [26].

Fig. 14. Marie Mosquini (1930). Lee de Forest and Robert Millikan in deForest's inner office in California (August 1952). Lee and Marie de Forest, posing on dance floor (1950–1960). Dr. Lee de Forest memorial award presentation. From left: Marie de Forest, unknown young woman, and Merrill Swan (1960s) [26]

всякого сомнения, счастлив тот муж, у которого такая редкая жена, такая любящая, заботливая и такая прелестная, какую я нашел в моей Мари Москини. В этом отношении я снова действительно богат» [9, р. 411]. Любовь — это то чувство, которое давало духовные силы де Форесту для его научных свершений до конца его жизни.

В 1961 году Мари пожертвовала документы своего покойного мужа, множество фотографий, его OSCAR и большую часть его технологий Фонду Перхама (*Perham Foundation*) в Сан-Хосе. В начале 1970-х коллекция Перхама стала Музеем электроники Предгорья (*Foothills Electronics Museum*). Когда в начале 1990-х годов этот музей закрылся, бумаги де Фореста были перемещены в безопасное хранилище для хранения. В 2003 году коллекция Перхама, в том числе коллекция де Фореста, были переданы Историческому музею Сан-Хосе (*History San Jose*), главному музею истории Силиконовой долины.

В 1968 году Мари стала радиолюбителем с позывным WB6ZJR. В 1973 году она приняла участие в радиопередаче, посвященной столетию со дня рождения мужа.

## 8. Заключение

Де Форест был изобретателем, который, вероятно, внес наибольший вклад в переход от беспроводного телеграфа А. С. Попова к радиоэлектронной системе, передающей голос и музыку. Но, несмотря на название его мемуаров «Отец радио», он лишь отчасти добился славы, к которой стремился всю свою жизнь, возможно, потому, что всегда предпочитал

работать самостоятельно. Часто его окружали нечистые на руку сотрудники, к тому же, он никогда не сопоставлял свою научную проницательность с методом или трудовой этикой, часто оставляя незавершенным то, что он блестяще воспринял.

В конце концов де Форест не был уверен, радоваться или огорчаться тому миру, который он помог создать. В *Dawn of the Electronic Age*, статье 1952 года, которую он написал для *Popular Mechanics*, он ликовал о своем создании *Audion*, называя его «этот маленький желудь, из которого вырос гигантский дуб, который сегодня охватывает весь мир» [27]. В то же время он сетовал на «моральную испорченность» коммерческих вещательных средств массовой информации. «Меланхолическое представление о нашем национальном ментальном уровне получается из обзора “дебилности” большинства сегодняшних радиопрограмм», — писал он.

Заглядывая вперед в будущее приложений электроники, де Форест становился еще мрачнее. Он считал, что «электронные физиологи» в конечном итоге смогут отслеживать и анализировать «мысли или мозговые волны», позволяя «радость и горе измерять в определенных количественных единицах». В конце концов, заключает он, «профессор может внедрить знания в сопротивляющиеся мозги своих учеников XXII века. Какие ужасающие политические возможности могут скрываться в них! Будем благодарны, что такие вещи предназначены только для потомков, а не для нас» [28].

В 1931 году Ли Де Форест продал одну из своих компаний RCA. В 1934 году он выиграл дело через судебный спор с Армстронгом, но потерял в некоторой степени свой общественный имидж. Невзирая на это, Ли де Форест всю свою жизнь следовал философии Иоганна Вольфганга Гёте и добивался успеха: «Человек должен непоколебимо верить, что непостижимое постижимо, иначе он ничего не сможет исследовать».

За свой вклад Ли Де Форест был награжден в 1922 году Почетной медалью Института радиоинженеров, а в 1946 году медалью Эдисона от AIEE, рис. 15. Медаль Эдисона была присуждена де Форесту за «новаторские достижения в области радио и за изобретение вакуумной лампы с сеточным управлением, имеющее глубокие технические и социальные последствия». Дэвид Сарнофф, президент RCA, после анализа научных и инженерных достижений де Фореста назвал электронную лампу одним из двадцати величайших изобретений всех времен [29].

«Электронные лампы были ключом к победе в войне и сегодня являются одной из надежд на достижение мира», — сказал Сарнофф [29]. Далее он продолжил: «Важно, что это изобретение выдержало испытание временем на протяжении сорока лет и что оно все еще продолжает расширять сферу своей полезности. В современной телеграфии, телефонии, радио, кинема-



тографии, фонографах, транспорте, навигации, авиации и сотнях промышленных операций теперь используется основное изобретение де Фореста».



Рис. 15. Награждение Ли Де Фореста медалью Эдисона в AIEE. 1946 г. Лицевая и оборотная части медали Эдисона IEEE за технические достижения.

Fig. 15. Lee De Forest was awarded the Edison Medal in AIEE. 1946. For technical achievement the IEEE Edison Medal's obverse and reverse

За свою жизнь Ли де Форест получил более 300 патентов. Его последний патент был получен в 1957 году, когда ему было 84 года. Его изобретения, казалось, должны были принести де Форесту многомиллионное состояние, но на момент его смерти у него было всего 1250 долларов наличными. Когда его завещание было подано в суд, то адвокат де Фореста заявил, что его клиент ничего не делал, чтобы увеличить свои активы, хотя у изобретателя была личная собственность, и он владел патентами, которые могли бы приносить дополнительный доход [30]. Ли де Форест скончался 30 июня 1961 года в Голливуде. Его похоронили на кладбище миссии Сан-Фернандо в Лос-Анджелесе, штат Калифорния.

### Список литературы

1. Пестриков В. М. Проблемы дальней телефонии на рубеже 19 и 20 веков и поиски их решения // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 1. С. 117—151.
2. Пестриков В. М. Майкл Пупин и пупинизация телефонных линий // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 2. С. 260—293.
3. Пестриков В. М. Выбор тренда развития Bell System в начале XX века // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 3. С. 395—427.
4. Пестриков В. М. Роберт Милликен и его роль в рождении современных радиоламп // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 4. С. 587—610.
5. Пестриков В. М. Генезис аудиона Ли де Фореста // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2021. Т. 4, № 1. С. 42—79.
6. Пестриков В. М. Продажа Ли де Форестом прав на аудион AT&T и ее значение для развития радиотехники // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 2. С. 211—249.
7. Пестриков В. М. Успех бизнес-плана компании AT&T // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 3. С. 327—355.

8. Пестриков В. М. Изобретение электронного лампового усилителя звуковой частоты // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 4. С. 433—455.
9. Lee de Forest. Father of Radio : The Autobiography of Lee de Forest. Chicago : Wilcox & Follett, 1950. First ed. 502 p.
10. Armstrong E. H. Operating features of the audion // Electrical World. December 12, 1914. Vol. 64, no. 24. P. 1149—1152.
11. Tyne Gerald F. J. The RJ4 Detector and the Wallace Mystery. In : Antique Wireless Association Monograph (New Series). 1978. No. 1. P. 5—9.
12. Armstrong E. H. Wireless receiving system. Patent US1113149A. Patented October. 6, 1914. Application filed October 29, 1913.
13. De Forest L., Logwood C. Wireless receiving system. Patent US1170881A. Patented February 8, 1916. Application filed March 12, 1914.
14. Secor H. W. Dr. de Forest Wins Feed-Back Verdict // Short Wave Craft. 1934. No. 8. P. 199.
15. Armstrong E. H. Wireless Receiving System. Patent US 1113149A. Patent Application filed October 28. 1913. Patented Oct. 6. 1914.
16. Edwin Armstrong Invents the Regenerative Circuit.  
URL: <https://historyofinformation.com/detail.php?id=2387> (01.07.2023).
17. Armstrong E. H. Some Recent Developments in the Audion Receiver // Proceedings of the IRE. Sept. 1915. Vol. 3, no. 3. P. 215—247.
18. Judge Mayer sustains Armstrong radio patent // Pacific radio news. July 1921. Vol. 2, no. 12. P. 410.
19. Armstrong E. H. The Regenerative Circuit // The Electric Journal. 1921. Vol. 18, no. 4. P. 153.
20. Forest Lee de. Oscillating-current generator. Patent US1201270A. Patented October 17, 1916. Application filed September 14, 1914.
21. The De Forest DV and DL Valves.  
URL: <http://www.r-type.org/articles/art-277.htm> (02.07.2023).
22. Base UV. URL: <http://www.r-type.org/static/baseuv.htm> (02.07.2023).
23. Forest Lee de. Means for recording and reproducing sound. Patent US1446246A. Patented February 20, 1923. Application filed September 18, 1919.
24. Telling The Story of Sound Motion Pictures Through Contemporary Writings With additional narrative by the Curator. URL: <http://www.widescreenmuseum.com/sound/sound03.htm> (02.07.2023).
25. DeForest marriage verified // The New York Times. October 11, 1930.
26. Photos for Lee De Forest. Perham Collection of Early Electronics. History San Jose. Photo Record. URL: [https://historysanjose.pastperfectonline.com/Photo?search\\_criteria=Lee+De+Forest+&onlyimages=false](https://historysanjose.pastperfectonline.com/Photo?search_criteria=Lee+De+Forest+&onlyimages=false) (02.07.2023).
27. Carr N. The shallows. What the Internet Is Doing to Our Brains. New York–London : W. W. Norton & Company, 2010. P. 54—55.
28. Forest Lee de. Dawn of the Electronic Age // Popular Mechanics, January 1952. P. 364.
29. De Forest honored as radio pioneer // The New York Times. January 2, 1947.
30. Lee de Forest // Los Angeles Times, July 2, 1961.  
URL: <https://projects.latimes.com/hollywood/star-walk/lee-de-forest/index.html> (02.07.2023).

### Информация об авторе

**Пестриков Виктор Михайлович**, д. т. н., профессор Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-0466-881X.

# Scientific Discoveries and Inventions of Lee de Forest, which Contributed to the Progress in Radio Tube Technology and Social Development

V. M. Pestrikov

*St. Petersburg State University of Film and Television*  
13, Pravda st. St. Petersburg, 191119, Russian Federation  
pvm205@yandex.ru

Received: July 2, 2023

Peer-reviewed: July 5, 2023

Accepted: July 10, 2023

**Abstract:** *The scientific discoveries and inventions of Lee de Forest, which left a noticeable mark in radio tube technologies and society, are considered and analyzed. De Forest's struggle for priority in opening feedback in an audio frequency amplifier is described. The superiority of de Forest in recording sound on film based on the Phonofilm technology invented by him was noted. It is shown how in the dramatic life of de Forest there was a place not only for scientific research, but also for love for women.*

**Keywords:** *Lee de Forest, feedback, regenerative radio reception, gridlick, DV triodes, Phonofilm, Marie Mosquini.*

**For citation (IEEE):** V. M. Pestrikov, "Scientific Discoveries and Inventions of Lee de Forest, which Contributed to the Progress in Radio Tube Technology and Social Development," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 4, pp. 410–439, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.4.31. (In Russ.).

## References

- [1] V. M. Pestrikov, "Problems of Long-Distance Telephony at the Turn of the 19th and 20th Centuries and the Search for their Solutions," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 1, pp. 117–151, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.1.10. (In Russ.).
- [2] V. M. Pestrikov, "Michael Pupin and Pupinization of Telephone Lines," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 2, pp. 260–293, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.2.20. (In Russ.).
- [3] V. M. Pestrikov, "Choice of Development Trend of Bell System at the Beginning of the 20th Century," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 3, pp. 395–427, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.3.30. (In Russ.).
- [4] V. M. Pestrikov, "Robert Millikan and His Role in the Birth of Modern Radio Tubes," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 4, pp. 587–610, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.4.41. (In Russ.).
- [5] V. M. Pestrikov "The genesis of Lee de Forest audion," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 4, no. 1, pp. 42–79, 2021. (In Russ.).

- [6] V. M. Pestrikov, "Lee de Forest's Sale of Audion Rights to AT&T and Its Importance for the Development of Radio Technics," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 211–249, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.2.18. (In Russ.).
- [7] V. M. Pestrikov, "Success Business Plan for AT&T," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 3, pp. 327–355, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.3.25. (In Russ.).
- [8] V. M. Pestrikov "Invention of an electronic tube audio frequency amplifier," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 4, pp. 433–455, 2020. (In Russ.).
- [9] Lee De Forest, *Father of Radio*. 1950.
- [10] E. H. Armstrong, "Operating features of the audion," *Electrical World*, vol. 64, no. 24, pp. 1149–1152, December 12, 1914.
- [11] G. F. J. Tyne, "The RJ4 Detector and the Wallace Mystery", in : *Antique Wireless Association Monograph (New Series)*, no. 1, pp. 5–9, 1978.
- [12] E. H. Armstrong, "Wireless receiving system." Patent US1113149A. Patented October. 6, 1914. Application filed October 29, 1913.
- [13] L. De Forest and C. Logwood, "Wireless receiving system." Patent US1170881A. Patented February 8, 1916. Application filed March 12, 1914.
- [14] W. H. Secor, "Dr. de Forest Wins Feed-Back Verdict," *Short Wave Craft*, no. 8, p. 199, 1934.
- [15] E. H. Armstrong, "Wireless Receiving System." Patent US 1113149A. Patent Application filed October 28, 1913. Patented Oct. 6, 1914.
- [16] "Edwin Armstrong Invents the Regenerative Circuit."  
URL: <https://historyofinformation.com/detail.php?id=2387>. (01.07.2023).
- [17] E. H. Armstrong, "Some Recent Developments in the Audion Receiver," *Proceedings of the IRE*, vol. 3, no. 3, pp. 215–247, Sept. 1915.
- [18] "Judge Mayer sustains Armstrong radio patent," *Pacific radio news*, vol. 2, no. 12, p.410, July 1921.
- [19] E. H. Armstrong, "The Regenerative Circuit," *The Electric Journal*, vol. 18, no. 4, p.153, 1921.
- [20] Lee de Forest, "Oscillating-current generator." Patent US1201270A. Patented October 17, 1916. Application filed September 14, 1914.
- [21] "The De Forest DV and DL Valves."  
URL: <http://www.r-type.org/articles/art-277.htm> (02.07.2023).
- [22] "Base UV." URL: <http://www.r-type.org/static/baseuv.htm> (02.07.2023).
- [23] Lee de Forest, "Means for recording and reproducing sound." Patent US1446246A. Patented February 20, 1923. Application filed September 18, 1919.
- [24] "Telling The Story of Sound Motion Pictures Through Contemporary Writings With additional narrative by the Curator."  
URL: <http://www.widescreenmuseum.com/sound/sound03.htm> (02.07.2023).
- [25] "DeForest marriage verified," *The New York Times*. October 11, 1930.
- [26] "Photos for Lee De Forest. Perham Collection of Early Electronics. History San Jose. Photo Record." URL: [https://historysanjose.pastperfectonline.com/Photo?search\\_criteria=Lee+De+Forest+&onlyimages=false](https://historysanjose.pastperfectonline.com/Photo?search_criteria=Lee+De+Forest+&onlyimages=false) (02.07.2023).
- [27] C. Nicholas, *The shallows. What the Internet Is Doing to Our Brains*. New York–London : W. W. Norton & Company, pp. 54–55, 2010.
- [28] Lee de Forest, "Dawn of the Electronic Age," *Popular Mechanics*, p. 364, January 1952.
- [29] "De Forest honored as radio pioneer," *The New York Times*, January 2, 1947.
- [30] "Lee de Forest," *Los Angeles Times*, July 2, 1961.  
URL: <https://projects.latimes.com/hollywood/star-walk/lee-de-forest/index.html> (02.07.2023).

### **Information about the author**

**Viktor M. Pestrikov**, Dr. Tech. Sc., Professor, St. Petersburg State University of Film and Television, St. Petersburg, Russian Federation. ORCID 0000-0003-0466-881X.

УДК 621.37-621.39(091)

## Коротковолновый успех арктической экспедиции Дональда Макмиллана

Пестриков В. М.

*Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения  
ул. Правды, 13, Санкт-Петербург, 191119, Российская Федерация  
pvm205@yandex.ru*

Получено: 21 июня 2023 г.

Отрецензировано: 30 июня 2023 г.

Принято к публикации: 30 июня 2023 г.

**Аннотация:** Показано, как в 1925 г. военно-морской летчик Ричард Бёрд, исследователь Дональд Макмиллан и основатель Zenith Radio Юджин Макдональд успешно организовали первую арктическую экспедицию с использованием авиации и коротковолнового радио. В центре внимания находятся технологии коротковолновой радиосвязи Zenith Radio Corp., которые позволили достигнуть конкретной цели и добиться успеха.

**Ключевые слова:** полярная экспедиция 1925 г., Ричард Э. Бёрд, Дональд Б. Макмиллан, Юджин Ф. Макдональд-младший, Zenith Radio Corporation, коротковолновая связь в Арктике, коротковолновые радиопередатчики и радиоприемники компании Zenith.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Пестриков В. М. Коротковолновый успех арктической экспедиции Дональда Макмиллана // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 4. С. 440—459.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018):** Пестриков, В. М. Коротковолновый успех арктической экспедиции Дональда Макмиллана / В. М. Пестриков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 4. — С. 440—459.

### 1. Введение

Первая половина 20-х годов XX века была ознаменована международным соперничеством в покорении в начале Северного, а потом Южного полюсов. Эти неизведанные районы земного шара манили к себе не только ученых, но также государственных деятелей и авантюристов.

В 1925 году, с 20 июня по 22 августа, развернулось масштабное путешествие, когда экспедиция Макмиллана — Макдональда отправилась исследовать самые отдаленные уголки Арктики. Со времен экспедиции

известного полярного исследователя Роберта Пири (*Robert Edwin Peary*, 06.05.1856—20.02.1920) в 1908—1909 гг. Соединенные Штаты не предпринимали никаких серьезных усилий по дополнительному исследованию земель выше  $75^{\circ}$  широты. В стремлении получить знания о холодных северных землях впервые в истории во время путешествия 1925 года использовались как радиосвязь, так и авиация. Радиосвязь сыграла значительную роль в обеспечении успеха экспедиции и в нескольких случаях оказалась связующим звеном между жизнью и смертью.

## 2. Особенности экспедиции Дональда Макмиллана

В 1925 году Ричард Эвелин Бёрд (Бэрд) (*Richard Evelyn Byrd*, 25.10.1888—11.03.1957), американский аристократ и капитан-лейтенант (*Lieutenant Commander*) ВМС США, с целью прославиться и сделать карьеру, убедил секретаря военно-морского флота Куртиса Уилбура (*Secretary of the Navy Curtis D. Wilbur*) в необходимости организации мобильной экспедиции для исследования территорий, прилегающих к Северному полюсу и испытании авиационной техники в экстремальных климатических условиях в интересах военно-морского флота.

Необходимость такой экспедиции диктовалась получением ценных сведений о гидрологической и магнитной обстановке в районе острова Гренландия и Северного полюса, а также возможностью открытия новых территорий, рис. 1.

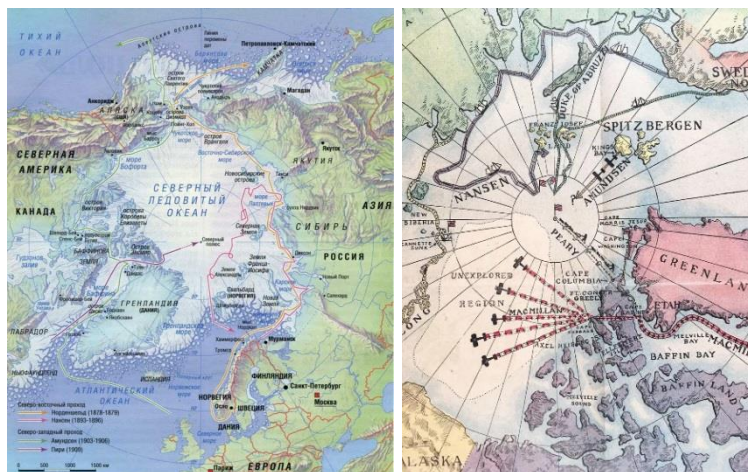


Рис. 1. Географические карты: Достижения Северного полюса (слева) и трассы полетов в Арктике Ричарда Бэрда в 1925 г. (справа) [1].

Fig. 1. Geographic maps: North Pole advances (left) and Arctic flight paths by Richard Byrd in 1925 (right) [1]

Полученные данные могли быть использованы для полетов военных и коммерческих самолетов на Аляску. Проект поддержал президент США Калвин Кулидж-младший (*John Calvin Coolidge, Jr.*, 04.07.1872—05.01.1933) и благодаря этому Ричард Бёрд (рис. 2) получил для своего проекта самолеты и штат экспедиции. Вскоре он узнал, что к покорению Северного полюса готовится не только он, но и норвежец Рауль Энгельбрегт Гравнинг Амундсен (*норв. Roald Engelbregt Gravning Amundsen*, 16.07.1872—18.06.1928), а также его соотечественник Дональд Макмиллан (*Donald Baxter MacMillan*, 10.11. 1874—07.09.1970).



Рис. 2. Ричард Эвелин Бёрд [2, с. 520].

Маршруты самолетов над Северным полюсом, в том числе маршрут, которым управлял Ричард Э. Бёрд в 1926 году.

Fig. 2. Richard Evelyn Byrd. Airplane routes over the North Pole, including the one flown by Richard E. Byrd in 1926

Дональд Макмиллан был известным полярным исследователем. Он участвовал в нескольких полярных экспедициях, в частности, экспедиции к Северному полюсу организованной Робертом Пири в 1909 году. Благодаря мощной спонсорской поддержке Национального географического общества (*National Geographic Society*) и финансовой помощи чикагского миллионера Ю. Ф. Макдональда (*Eugene F. McDonald, Jr.*, 11.03.1886—1958), основателя и исполнительного директора *Zenith Radio Corporation* (1923—1958), для своей новой экспедиции он получил специальный самолет. Ричард Бёрд, чувствуя, что его усилий для собственной экспедиции может не хватить, предложил Дональду Макмиллану объединиться для достижения единой цели. Д. Макмиллан неохотно согласился, но с условием, что он будет главным руководителем проекта, рис. 3. В этой арктической экспедиции Р. Бёрд взял на себя руководство авиационной группой, которая должна была оказывать ей поддержку с воздуха [3].

Входившие в экспедицию Д. Макмиллан, Ю. Ф. Макдональд и Р. Бёрд являлись морскими офицерами в чине капитан-лейтенантов, по-



этому при планировании экспедиции учитывались интересы ВМФ США, который ее поддерживал. Исходя из этого, экспедиции были поставлены четыре основные цели.

1. Использовать самолеты в работе, чтобы изучить их полезность в арктических условиях.
2. В контакте с ВМФ США испытать коротковолновые радиопередатчики и радиоприемники, разработанные компанией *Zenith*, чтобы определить возможность их использования для надежной радиосвязи: в Арктике, в авиации, между судами и морскими базами по всему миру.
3. Расширить знания об арктических птицах и рыбах под руководством натуралиста экспедиции доктора Вальтера Керлза (*Dr. Walter N. Koelz*).
4. Собрать метеорологические данные, а также изучить магнитные поля и приливы в исследуемых районах с целью их использования для навигации в Арктике.



Рис. 3. Капитан-лейтенант Дональд Бэкстер Макмиллан перед отплытием в Арктику. Вискассет штат Мэн (*Wiscasset, Maine*). Фото. 20 июня 1925 г. Силуэты мачт *Bowdoin* на фоне высокого мыса на Лабрадоре. На борту флагмана *Bowdoin*: руководитель арктической экспедиции командир Дональд Б. Макмиллан, доктор Гилберт Кросвенор, президент Национального географического общества, и доктор Уилиред Т. Гренфелл, медицинский миссионер [4].

Fig. 3. Lieutenant Commander Donald Baxter MacMillan before sailing to the Arctic. Wiscasset, Maine (*Wiscasset, Maine*). Photo. June 20, 1925. The masts of the “*Bowdoin*” silhouetted against a high promontory on Labrador. On board the flagship “*Bowdoin*”. Commander Donald B. MacMillan, leader of the MacMillan Arctic Expedition; Dr. Gilbert Crosvenor, President of the National Geographic Society, and Dr. Wilired T. Grenfell, medical missionary [4].

Однако, главной целью экспедиции, все же, было расширение знаний о последних неисследованных областях Северного полушария на тот период времени. А это ни много ни мало, почти 3 миллиона квадратных миль между северным побережьем Аляски и Северным полюсом.

Для экспедиции предполагалось приобрести два парохода — *Bowdoin* и *Peary*, на которых экспедиция должна была добраться до небольшого поселения Ита (*Eta*) на северо-западном побережье Гренландии

и создать там свою базу. Отсюда экспедиция планировала проводить свои исследования территорий в районе Северного полюса, используя для этого в том числе и самолеты. Шхуна *Bowdoin* была построена в 1921 году и предназначалась для плавания в арктических водах.

### 3. Подготовка экспедиции

К середине февраля Макдональд и Макмиллан определились с выбором летательных аппаратов для воздушной разведки в Арктике. Ю. Ф. Макдональд, используя свой политический вес и действуя через своего друга президента Калвина Кулиджа, получил для экспедиции от ВМФ США три самолета-амфибии типа *Loening OL-2*, рис. 4 [5]. Самолеты-амфибии были собраны на месте высадки экспедиции под руководством Ричарда Э. Бёрда. Заметим, что во время работы экспедиции самолет Бёрда из-за неблагоприятных погодных ограничений и механических проблем выполнил всего около семи вылетов в пределах своей дальности и фактически не смог пролететь над полюсом.

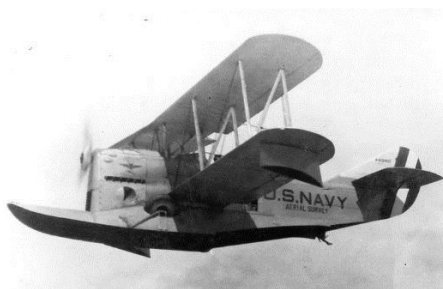


Рис. 4. Члены арктической экспедиции Макмиллана готовят один из своих самолетов-амфибий *Loening OL-2* к полету из Эта, Гренландия, 1925 год (Фото: Архив университета штата Огайо) [2, р. 523]). Самолет-амфибия *Loening OL-2*, на котором летал Ричард Бёрд в Арктике в 1925 г. Фото *Naval History and Heritage Command USA*.

Fig. 4. Members of the MacMillan Arctic Expedition prepare one of their *Loening OL-2* amphibious aircraft for a flight from Etah, Greenland, in 1925 (Photo: Ohio State University Archives) [2, p. 523]. The *Loening OL-2* amphibious aircraft flown by Richard Baird in the Arctic in 1925. Photo *Naval History and Heritage Command USA*

Американские военно-морские специалисты очень были заинтересованы в исследованиях экспедиции в области радиосвязи. Корабли США в тот период времени были оборудованы громоздкими длинноволновыми искровыми и дугowymi радиостанциями. Короткие радиоволны, ниже 200 метров (в то время средние волны считались короткими волнами), рассматривались как непригодные для дальней радиосвязи. Некоторые ученые утверждали, что короткими волнами для радиосвязи можно пользо-

ваться только в пределах прямой видимости. В связи с этим этот диапазон частот был отдан радиолюбителям, которые и стали развивать науку радиосвязи на коротких волнах. После того как американские и французские радиолюбители установили связь через Атлантику на волне 100 метров (январь 1923 г.), трансатлантические радиосвязи стали обычным делом для радиолюбителей.

Исследователи в радиолaborатории ВМС США старались не отставать от любительского сообщества в работах по использованию коротких радиоволн, но, невзирая на это, к 1925 году судовые радиопередатчики продолжали работать на длинных волнах.

В целях достижения прогресса в применении коротковолновой радиосвязи Ю. Ф. Макдональд предложил привлечь радиолюбителей коротковолнников *ARRL (American Radio Relay League* — американская лига радиосвязи) для работы в военно-морских силах. И такие радисты появились, в частности, весной и летом 1925 г. на Тихоокеанском флоте США.

Когда перед инженерами лаборатории компании *Zenith Laboratories* поставили задачу разработать в течение двух месяцев коротковолновые радиостанции, оказалось, что производство таких радиоустройств находится в зачаточном состоянии.

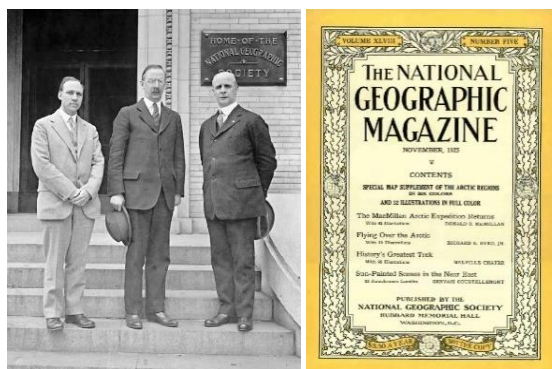


Рис. 5. Джон Рейнарц, Гилберт Гросвенор<sup>1</sup> и Дональд Макмиллан (слева направо) у офиса Национального географического общества США. Фото. 1925 г. Обложка журнала *THE NATIONAL GEOGRAPHIC MAGAZINE* за ноябрь 1925 г., где помещены статьи об экспедиции Макмиллана [8].

Fig. 5. John Reinartz, Gilbert Grosvenor and Donald MacMillan (from left to right) at the office of the National Geographic Society of the USA. Photo. 1925. Cover of *THE NATIONAL GEOGRAPHIC MAGAZINE*, November 1925, where articles about the MacMillan expedition are placed [8]

<sup>1</sup> Гилберт Гросвенор (Gilbert Hovey Grosvenor, 28.10.1875 – 04.02.1966) – президент географического общества (National Geographic Society USA) и редактор журнала *National Geographic* (1899—1954).

Для оказания помощи инженерам компании Ю. Ф. Макдональд весной 1925 года нанял Джона Рейнартца (*John L. Reinartz*, позывной *K6BJ*, 06.03.1894—05.10.1964), известного как блестящего молодого разработчика и конструктор коротковолновых радиостанций, рис. 5 [6—7]. Его зарплата составила \$1000 в месяц и была самой высокой когда-либо установленная радисту. В обязанности Д. Рейнартца, кроме конструирования радиоаппаратуры, входило также привлечение своих коллег радиолюбителей для работы на новых диапазонах коротких волн.

Группу разработчиков радиостанций возглавил Карл Хассель (*Karl Hassel*), в нее вошли Г. Фобс (*H. C. Forbes*) и Джон Рейнартц. Период с марта по май месяц 1925 года стал напряженным в работе инженеров компании *Zenith*, которые отвечали за создание радиоэлектронного оборудования для экспедиции.

Размер и конфигурация радиорубки на борту *Peary* не были известны вплоть до окончания весны, пока не был найден и куплен этот корабль. Только после этого Д. Рейнартц построил передатчик для *Peary* и установил его в радиорубке корабля.

Для каждого корабля конструировалась своя радиостанция. Для борта *Bowdoin* изготовлялся коротковолновый передатчик мощностью 250 Вт, а для корабля *Peary* — 2 кВт. Радиопередатчики могли работать на волнах 20, 40, 80 и 275 метров. Важно отметить, что передающая аппаратура на борту *Bowdoin* была собрана и испытана в лаборатории *Zenith* в Чикаго, прежде чем она была отправлена для установки в порту *Wiscasset* (штат Мэн).

Для приема радиосообщений с пресс-конференций и сигналов точно-го времени был выбран радиовещательный батарейный радиоприемник *Super VII Zenith* с длинноволновым диапазоном волн (520—1700 кГц) и стоимостью \$550. Габариты аппарата были впечатляющие: 44"×15½"×10½" (1,12×0,4×0,27 м)! Вес его тоже составлял 55 фунтов (25 кг), рис. 6.

Радиоприемник *Super VII Zenith* был собран по схеме прямого усиления на шести радиолампах. В радиоконструкции использовалось пять радиоламп типа *Cunningham CX-301A* и одна — *Raven MU-20 (Serial 61376)*, рис. 7.

*Super VII Zenith* имел два каскада высокой частоты, детекторный каскад на вакуумном триоде, и три каскада звуковой частоты на трансформаторах с прослушиванием передач на наушники. Благодаря наличию трех перестраиваемых контуров, с помощью переменных конденсаторов, приемник обладал высокой чувствительностью и избирательностью.

В комплект радиоаппаратуры кораблей экспедиции входило также два портативных радиовещательных приемника на случай возможных критических ситуаций.

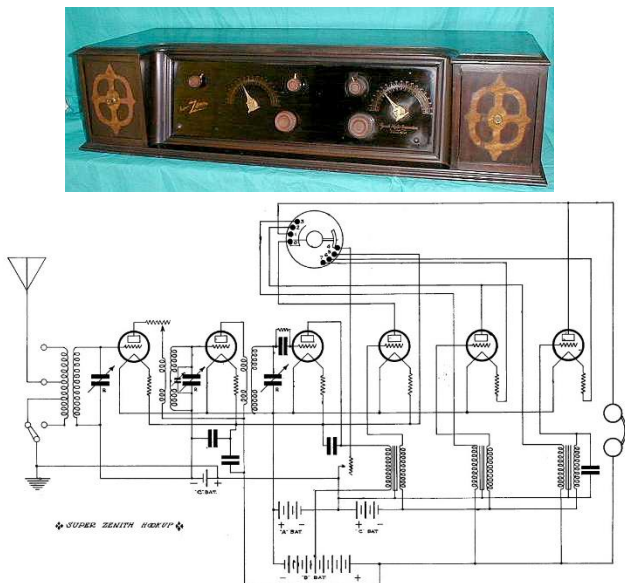


Рис. 6. Общий вид радиоприемника Super VII Zenith и его принципиальная схема. 1925 г.

Fig. 6. General view of the Super VII Zenith radio receiver and its schematic diagram. 1925



Рис. 7. Радиолампы: 0,1A/CX-301-A CUNNINGHAM (Short Base). Made in USA by RCA (слева) и Raven MU-20 (Serial 61376) (справа).

Fig. 7. Radio tubes: 0.1 A/CX-301-CUNNINGHAM (short base). Made in the USA by RCA (left) and Raven MU-20 (serial number 61376) (right)

#### 4. Разработки Д. Рейнарта

В лаборатории компании Zenith Джону Рейнарту было поручено разработать новую конструкцию коротковолновой радиостанции для уста-

новки на самолетах-амфибиях *Loening*, которые входили в состав экспедиции. В середине мая 1925 года прототип такой радиостанции был помещен на борт морского самолета на поплавках и протестирован во время полетов над озером Мичиган. О ходе испытаний первого самолета с установленной коротковолновой радиоаппаратурой *Reinartz-Zenith*, способной работать в условиях полета и на земле, вскоре сообщил выпуск пресс-релиза *Zenith*. Одним из отличий аппаратуры Д. Рейнарта было использование гальванических батарей для ее питания, в то время как прежние самолетные конструкции радиостанций работали от ветрогенераторов, как правило, установленных на крыле. Это было чрезвычайно важно, так как генераторы зависели от величины давления воздуха вокруг воздушного судна и могли оказаться бесполезными в Арктике, в условиях экстремального пониженного давления.

В начале июня 1925 года группа инженеров *Zenith* под руководством Д. Рейнарта установила радиооборудование на борту *Peary*, который находился на базе военно-морского флота в Бостоне. Радиоприемная аппаратура была установлена на пароходе *Bowdoin*, когда тот стоял у причала в штате Мэн, как раз к прогнозируемому в середине июня отправлению экспедиции.

Через некоторое время, компания *Zenith* опубликовала пресс-релиз с описанием во всех деталях постройки коротковолновой радиостанции *Reinartz-Zenith* [9—10]. Эта конструкция радиостанции состояла из двух блоков: приемника и передатчика. Схема передатчика *Reinartz-Zenith* приведена на рис. 8.

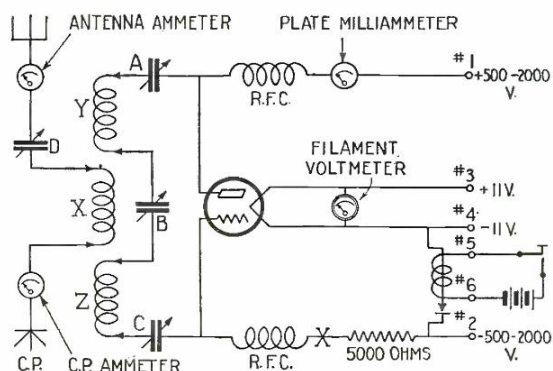


Рис. 8. Принципиальная схема радиопередатчика Джона Рейнарта, использовавшегося в полярной экспедиции Макмиллана в 1925 г. [11].

Fig. 8. Schematic diagram of the radio transmitter John Reinartz, used in the polar expedition of MacMillan in 1925. [11]

Радиотелеграфный передатчик радиостанции *Reinartz-Zenith* был собран на одном вакуумном триоде *RCA Radiotron* типа *UV204A* мощностью 250 Вт, рис. 9. Этот триод при максимальной мощности имел предельную частоту генерирования около 3 МГц. Лампы типа *UV204A* производились компанией *GE* для *RCA*, начиная с 1923 года [12].

Прототипом триода *UV204A* является лампа 1 “P”, разработанная в начале первой мировой войны. В 1918 году появился усовершенствованный вариант *VT-10*, имевший такой же цоколь, как позже у появившегося триода *UV-204*, а затем у его приемника *UV-204A*. Компания *RCA* в тот период времени не имела производственных мощностей по производству вакуумных триодов и была вынуждена покупать такую продукцию у *GE* и *Westinghouse*.

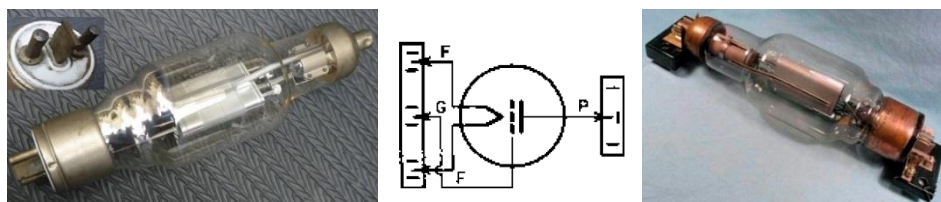


Рис. 9. Вакуумный триод типа *UV204A*: общий вид, цоколевка и с подключенными панельками к цоколям.

Fig. 9. Vacuum triode type *UV204A*: general view, pinout and with sockets connected to the sockets

В марте 1921 года *RCA* приобрела все права на триод *UV-204* у *GE*, и уже в июле начала их продажу под маркой *RCA RADIOTRON* по цене \$110,00. Панельки с креплениями для цоколей стоили \$ 2,00.

В ранних образцах триода для его элементов (анод, цоколь) использовалась латунь, а в более поздних конструкциях их стали делать из алюминия. Сначала нить накала изготавливалась из чистого вольфрама и была рассчитана на ток 3,85 А при напряжении 11 В, но уже в поздней конструкции *UV204A* для увеличения электронной эмиссии в качестве материала нити использовался оксидированный вольфрам. Триод работал при максимальном анодном токе 275 мА и напряжении 3000 В. Габариты лампы: длина — 14,38" (36,5 см), диаметр — 3,75" (9,5 см).

Все детали передатчика крепились на деревянной раме, состоящей из двух вертикальных стоек и трех поперечных планок, рис. 10. В качестве материала рамы использовалось дерево твердой породы, проваренное в парафине.







Хотя по этому поводу есть и другое мнение, связанное с технической некомпетентностью Рейнарта, которая не позволила ему отремонтировать радиопередатчик на корабле *Peary*. Вероятно, дефекты устройства были уже заложены на стадии его проектирования или сборки. С другой стороны, менее квалифицированные радисты корабля *Peary*, чем Рейнартц, Пауль Макги (*Paul. J. McGee*) и Гарольд Грэй (*Harold R. Gray*) сумели найти причину поломки радиоустройства. Они быстро ее устранили после того, как Рейнартц потратил много времени на поиск неисправности. Из-за этого случая Макдональд не стал удалять Рейнарта из экспедиции, так как посчитал, что у него мало оснований для принятия такого решения, есть только мнения Г. Грэя и П. Макги. В этот момент арктическая экспедиция уже была в районе лабрадорского побережья.

Из записей в радиожурнале стало известно, что Рейнартц во время работы в экспедиции вел себя неподобающим образом. Он не только игнорировал вызовы от базовой мощной радиостанции 9ZN компании *Zenith* в Чикаго (рис. 12), но также и от других морских передатчиков, при продвижении судов экспедиции на север, предпочитая DX со своими коллегами радиолюбителями.

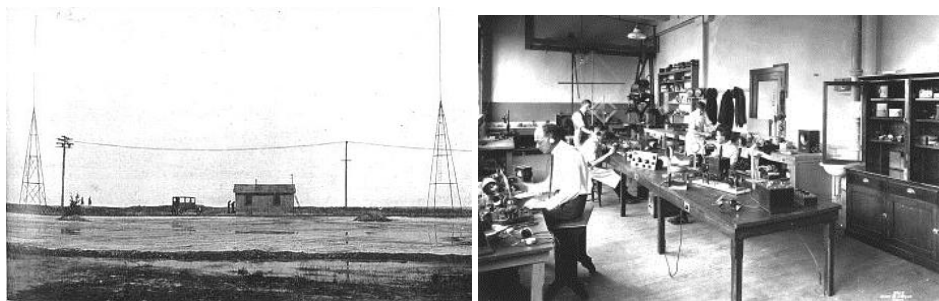


Рис. 12. Радиостанция 9ZN и ее антенны.  
Радиолaborатория компании *Zenith*. Чикаго. 1920 г.

Fig. 12. Radio station 9ZN and its antennas.  
Zenith radio laboratory. Chicago. 1920

Анализ обмена текстовыми сообщениями между экспедицией в Ита и Национальным географическим обществом, а также пунктом военно-морского флота в Вашингтоне, указывает на то, что некоторые сообщения, которые Рейнартц зафиксировал, были «подчищены» и никогда в действительности не только не принимались, но и не передавались, что в дальнейшем подтвердилось. Получается, что Рейнартц постоянно лгал. Об этом серьезном нарушении правовой этики радиста на корабле упоминается в личной переписке Макдональда и Макмиллана.

И, наконец, не укладывается в сознание, почему Рейнартц проигнорировал график выхода в эфир каждые четыре часа, когда корабль *Bowdoin* пересекал бурный пролив Дэвиса в южном направлении. По словам Макдональда, единственным оправданием Рейнартца в этот промежуток времени может служить только его «морская болезнь».

Главный оператор Густафсон (*Chief Operator Gustafson*) радиостанции 9XN, который ознакомился с журналом Рейнартца, позже письменно подтвердил, что, согласно записи, «морская болезнь» была у него только несколько дней. Допущенное Рейнартцом нарушение графика выхода в радиоэфир могло в любой момент времени привести к катастрофе двух кораблей экспедиции и гибели их экипажей.

Вся история морских радистов с момента их появления на кораблях показывает, что многие из них отдавали свои жизни только ради того, чтобы послать в эфир сигнал *SOS*, когда их судно терпело катастрофу. Все это контрастирует с поведением Рейнартца и случившаяся у него морская болезнь не может быть оправданием. Такое его поведение подлежит рассмотрению только с позиции этических норм сообщества радиолюбителей связистов, из которого он был выбран для экспедиции. Как известно, одним из основных принципов этого сообщества является помощь людям в критических ситуациях. Рейнартц, к сожалению, проигнорировал этот принцип.

После окончания экспедиции Макмиллана, Рейнартц в возрасте 31 год внезапно исчез с радиолюбительской арены. В радиолюбительском журнале *QST ARRL* перестали появляться его статьи. Это, по всей видимости, стало следствием его неадекватного поведения во время экспедиции. После арктической экспедиции Рейнартц некоторое время работал в ВМФ США. В 1958 г. стал научным сотрудником Института радиоинженеров. Последнее место его работы *ENIAC Co.*, откуда 30 января 1960 г. он ушел в отставку. Рейнартц получил 28 патентов на изобретения.

## 6. Работа экспедиции в Гренландии

Экспедиция Дональда Б. Макмиллана была оснащена радиопередатчиками и радиоприемниками, которые изготовила специально для Арктики корпорация *Zenith*. Все это было использовано компанией *Zenith* в рекламе своей продукции, которая всегда напоминала покупателям, что ее коротковолновые радиоприемники являются приоритетным выбором исследователей Арктики.

Владелец компании *Zenith* Ю. Ф. Макдональд не только оказал финансовую помощь в организации экспедиции, но и стал ее полноправным

членом. Реклама продукции своей компании была основным мотивом его участия в этом мероприятии, если вспомнить, что в 1924 году компания *Zenith* представила первый в мире портативный ламповый супергетеродинный радиоприемник. Девизом компании был лозунг: «Качество олицетворяет бренд компании» (англ. *The quality goes in before the name goes on*). Из двух кораблей на небольшой шхуне *Bowdoin* находилась основная часть научной группы, а Бёрд и его команда располагались на борту более крупного корабля *Peary*. Будучи командиром морского судна, Ю. Ф. Макдональд (рис. 13) доставил экспедицию до пункта назначения Ита 1 августа 1925 г., но дальше к Северному полюсу не пошел.

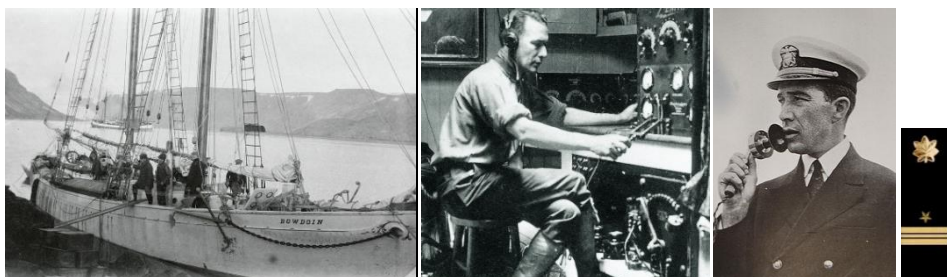


Рис. 13. Шхуна *Bowdoin*. Командир Юджин Макдональд за пультом коротковолнового передатчика на борту *Bowdoin* во время Арктической экспедиции. Ю. Ф. Макдональд-младший (*Eugene F. McDonald*) в форме капитан-лейтенанта и вид погоны капитан-лейтенанта США.

Fig. 13. The schooner *Bowdoin*. Commander Eugene McDonald at the controls of a shortwave transmitter on board the *Bowdoin* during the Arctic Expedition. Eugene F. McDonald, Jr. in the form of a lieutenant commander and a view of the epaulettes of a US lieutenant commander

Первое радиосообщение экспедиции из района Гренландии было послано 30 июля. Радиостанция *Peary* уведомила *Zenith Co.*, прессу и всех радиолюбителей о том, что первая радиопередача из районов Крайнего Севера состоится в субботу вечером, 1 августа. В назначенное время широкая аудитория слушала в течение 1,5 часов четко различаемые голоса Макдональда и Макмиллана. Передача принималась почти на всей территории США и даже в Лондоне, что подтвердили отчеты приемов, присланные в офис *Radio Zenith*. Макдональд был так взволнован тем, что его прогнозы относительно использования коротких волн в Арктике принесли свои плоды, что объявил: «Я и Макмиллан решили организовать по радио пресс-конференцию в “реальном времени” на следующий вечер, 3 августа, в 11 ч. 30 мин. вечера».

В тот вечер различные должностные лица *Zenith*, гости, представители газет Чикаго и *Associated Press*, собрались в маленьком домике радиостанции 9XN, расположенном в *Arlington Heights* (пригород Чикаго).

Согласно порядку проведения пресс-конференции каждый репортер мог задать только один вопрос. Всего было 5 вопросов, которые, затем были направлены Макдональду и Макмиллану с помощью азбуки Морзе. Ответы были получены очень быстро. Пресс-конференция настолько оказалась успешной, что Макдональд пообещал в ближайшие 30 дней передать радиопрограмму эскимосской музыки на радиостанцию 9XN, с которой она будет далее ретранслирована по всей Америке на средних волнах.

Длины волн, используемые аппаратурой «Зенит», составляли от 16 до 40 метров. Эти волны особенно выгодны тем, что их можно было использовать в дневное время, так как экспедиция работала весь световой день. Еще одним преимуществом этих волн было то, что для их отправки не требовалось чрезвычайно большой мощности. Радиосвязь была настолько успешной, что экспедиция не теряла связи с Национальным географическим обществом или военно-морским ведомством ни на один день в течение всего лета. Сообщения были получены по всей территории Соединенных Штатов, а также в Англии, Австралии, Новой Зеландии и Канаде.

Для большинства поклонников радио самыми запоминающимися радиопередачами стали две радиопрограммы, посланные в радиоэфир с борта *Peary*, пока он стоял три недели на якоре во фьорде Ита, почти в 700 километрах от Северного полюса.

Первая из этих передач состоялась вечером 12 августа и была отмечена в дневнике Макмиллана, как «наша трансляция на Америку». Вторая радиопередача вышла в радиоэфир в период между 16 и 21 августа и была услышана на борту корабля боевого обеспечения *USS Saettle* (AOE-3), а также другими кораблями, стоявшими на якоре в гавани Веллингтона (Новая Зеландия).

В августовский день 1925 года шесть эскимосов из самых северных поселений в мире собрались перед микрофоном радиопередатчика *Peary*, рис. 14. Эскимосы спели некоторые свои песни специально для адмирала ВМС США Роберта Кунца (*Robert Edward Coontz*, 11.06.1864—26.01.1935), который находился в это время на крейсере, стоявшем у берегов Тасмании, к югу от Австралии, почти на другом конце планеты.

Роберт Кунц, услышав необычное пение, воскликнул: «Это не пение. Это звучит как крик в колледже для меня. *Perfect!* (Идеально)». Президент *Zenith* Макдональд ликовал: «Вот как звучат эскимосские песни!!! Это доказывает, что наша передача должным образом достучалась до Вас». Лейтенант Эйшнелл (*Schnell*), работавший на радиостанции корабля *USS Saettle*, сообщил, что в Веллингтоне во время сеансов радиопередач слышимость сигналов от передатчика *Peary* почти всегда была значительно громче, чем от радиостанции 9XN из Чикаго.



Рис. 14. Эскимосы Гренландии у микрофона (крайний справа Ю. Макдональд).

Фото 1925 г. Адмирал ВМС США Роберт Кунц.

Fig. 14. The Eskimos of Greenland at the microphone (extreme right E. McDonald).

Photo. 1925. US Navy Admiral Robert Coontz

Наряду с трансляцией радиопередач из Арктики для широкой аудитории радиослушателей радисты Рейнартц на борту *Bowdoin* и Г. Грэй и П. Макги борту *Peary* вели активный радиообмен с радиолюбителями из разных стран мира.

20 августа Макмиллан заметил, что фьорд Ита начинает ночью замерзать. Это подтолкнуло его принять решение прекратить полностью воздушные операции и пока не поздно вернуться на юг. Самолеты были разобраны и погружены на корабли, и уже 22 августа экспедиция отплыла из Ита на юг, сразу перед замерзанием фьорда.

Во второй половине дня 9 октября корабли *Bowdoin* и *Peary* прибыли на остров Монхиган (*Monhegan*), в нескольких милях от Нью-Харбор (*New Harbor*, штат Мэн).

## 7. Заключение

Экспедиция Д. Макмиллан была большим событием в жизни человечества в нескольких аспектах. Впервые была продемонстрирована полезность использования самолетов для разведки в Арктике. Ричарду Бёрду не удалось совершить попытку полета над Северным полюсом, а отряд морской авиации так и не исследовал Северное море, но полеты были ценными в экспериментальном смысле. Он оказался в центре внимания, благодаря чему ему удалось вызвать большой интерес к авиации. Бёрд привлек внимание авиационных конструкторов к дискомфорту полетов в высоких широтах Арктики в открытой кабине и необходимости установки на самолетах закрытых кабин пилотов. С высоты летчики осмотрели более 30 тысяч квадратных километров местности, большая часть которой была недоступна для ног путешественников и ее никогда не видели люди. Авиация продемонстрировала свои преимущества перед собачьими

упряжками при преодолении больших расстояний в Арктике. Аэрофото-съемка дала неутешительные результаты из-за плохой погоды, но экспедиция увенчалась успехом, поскольку продемонстрировала радиосвязь SW из Арктического региона.

Сеансы радиосвязи, проведенные между кораблями *USS Saettle*, *Bowdoin* и *Peary*, убедительно показали военно-морскому флоту, что необходимо начать производить замену оборудования длинноволновых радиостанций на коротковолновые. Освоение коротких волн открыло перспективы использования этого диапазона волн для дальней радиосвязи на Земле при малых мощностях радиопередатчиков [13].

В экстремальных условиях Арктики ламповая радиоаппаратура компании *Zenith* подтвердила свои высокие эксплуатационные характеристики, что стало дополнительным стимулом к дальнейшему ее развитию. Все это нашло отражение в рекламе продукции компании и расширении ее ассортимента, рис. 15.

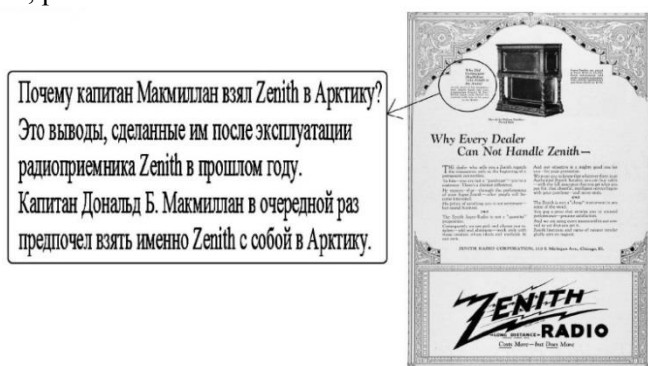


Рис. 15. Реклама радиоприемников компании *Zenith*. Сентябрь 1925 г.

Fig. 15. Advertisement for Zenith radio receiver. September 1925

Как показало время, опыт полученный летчиками и радистами экспедиции Д. Макмиллана в Арктике, был востребован впоследствии во второй мировой войне.

### Список литературы

1. Boston Sunday Post's Special Map to Help You Follow MacMillan, Amundsen and Other Polar Explorations. URL: <https://www.jamesarsenault.com/pages/books/5358/boston-sunday-post-s-special-map-to-help-you-follow> (20.06.2023).
2. Byrd R. E. Flying over the Arctic // The National geographic magazine. November, 1925. Vol. 48, no. 5. P. 519—532.
3. Cones H., Bryant J. Dangerous Crossings : The First Modern Polar Expedition, 1925 // International Journal of Naval History. December 2008. Vol. 7, no. 3. 14 p.

4. MacMillan in the Field // The National geographic magazine. October 1925. Vol. 48, no. 4. P. 473—476.
5. McDonald, Eugene (Gene) Jr. LCDR. URL: <http://navy.togetherweserved.com/usn/servlet/tws.webapp.WebApp?cmd=ShadowBoxProfile&type=EventExt&ID=228749> (18.06.2013).
6. Дрейзен И. Г. Джон Рейнартц // Радиолобитель. 1926. № 23-24. С. 458.
7. 1QP, K6BJ John L. Reinartz. Tribute to Ham Radio Operators. URL: <http://hamgallery.com/Tribute> (18.06.2023).
8. MacMillan D. B. The MacMillan Arctic expedition returns // The National geographic magazine. November, 1925. Vol. 48, no. 5. P. 477—518.
9. Передатчик и приемник Рейнартца для коротких волн // Радио всем. 1926. № 2. С. 19—20.
10. Передатчик Рейнартца // Радио всем. 1927. № 16. С. 388—389.
11. Reinartz J. L. Easy Construction for the “Ham” // Radio News. June 1927. P. 1462.
12. UV204A. N6JV'S TRANSMITTING TUBE MUSEUM. URL: <http://n6jv.com/museum/articles/articles/uv204.pdf> (18.06.2023).
13. Пестриков В. М. Эволюция ламповых устройств беспроводной передачи информации. СПб. : Изд-во СПбГУСЭ, 2012. 247 с.

### Информация об авторе

**Пестриков Виктор Михайлович**, д. т. н., профессор Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-0466-881X.

# Shortwave Success of Donald Macmillan's Arctic Expedition

V. M. Pestrikov

St. Petersburg State University of Film and Television  
13, Pravda st. St. Petersburg, 191119, Russian Federation  
pvm205@yandex.ru

Received: June 21, 2023

Peer-reviewed: June 30, 2023

Accepted: June 30, 2023

**Abstract:** It shows how naval aviator Richard Baird, explorer Donald MacMillan and Zenith Radio solid Eugene MacDonald successfully realized the first Arctic expedition using power and shortwave radio. The focus is on Zenith Radio Corp. shortwave radio technologies that deliver a specific goal and achieve success.

**Keywords:** polar expedition 1925, Richard E. Byrd, Donald B. MacMillan, Eugene F. McDonald, Jr., Zenith Radio Corporation, shortwave communications in the Arctic, shortwave radio transmitters and radio receivers from Zenith.

**For citation (IEEE):** V. M. Pestrikov, "Shortwave Success of Donald Macmillan's Arctic Expedition," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 4, pp. 440–459, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.4.32. (In Russ.).

## References

- [1] Boston Sunday Post's Special Map to Help You Follow MacMillan, Amundsen and Other Polar Explorations. URL: <https://www.jamesarsenault.com/pages/books/5358/boston-sunday-post-s-special-map-to-help-you-follow> (20.06.2023).
- [2] R. E. Byrd, "Flying over the Arctic," *The National geographic magazine*, vol. 48, no. 5, p. 519–532, November, 1925.
- [3] H. Cones and J. Bryant, "Dangerous Crossings : The First Modern Polar Expedition, 1925," *International Journal of Naval History*, vol. 7, no. 3, December 2008.
- [4] "MacMillan in the Field," *The National geographic magazine*, vol. 48, no. 4, pp. 473–476, October 1925.
- [5] Eugene (Gene) McDonald, Jr. "LCDR". URL: <http://navy.togetherweserved.com/usn/servlet/tws.webapp.WebApp?cmd=ShadowBoxProfile&type=EventExt&ID=228749> (18.06.2013).
- [6] I. G. Drazen, "John Reinartz," *Radiolyubitel'*, no. 23-24, p. 458, 1926. (In Russ.).
- [7] "1QP, K6BJ John L. Reinartz," Tribute to Ham Radio Operators. URL: <http://hamgallery.com/Tribute> (18.06.2023).
- [8] D. B. MacMillan, "The MacMillan Arctic expedition returns," *The National geographic magazine*, vol. 48, no. 5, pp. 477–518, November 1925.
- [9] "Reinartz transmitter and receiver for short waves," *Radio vsem*, no. 2, pp. 19–20, 1926. (In Russ.).



- [10] "Reinartz transmitter," *Radio vsem*, no. 16, pp. 388–389, 1927.
- [11] J. L. Reinartz, "Easy Construction for the 'Ham,'" *Radio News*, p. 1462, June 1927.
- [12] "UV204A. N6JV'S TRANSMITTING TUBE MUSEUM."  
URL: <http://n6jv.com/museum/articles/articles/uv204.pdf> (18.06.2023).
- [13] V. M. Pestrikov, *Evolution of tube devices for wireless transmission of information*. SPb : SPbGUSE Publishing House, 2012.

### Information about the author

**Viktor M. Pestrikov**, Dr. Tech. Sc., Professor, St. Petersburg State University of Film and Television, St. Petersburg, Russian Federation. ORCID 0000-0003-0466-881X.

# ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Том 6, № 4, 2023 г.

**Рубрики в соответствии с номенклатурой научных специальностей:**

Физические науки (1.3)

Электроника, фотоника, приборостроение и связь (2.2)

История науки и техники (5.6.6)

**Адрес редакции:**

ул. Университетская, д. 33, Севастополь, 299053

Тел. редакции: (8692) 41-77-41

<http://icrtjournal.com>

E-mail: [icrt.mail@mail.ru](mailto:icrt.mail@mail.ru)

**Отпечатано в типографии Printex**

ул. Кулакова, д. 59а, Севастополь, 299011

Тел.: (8692) 46-47-44, (8692) 45-56-78

Публикуемые материалы прошли обязательную процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии» обязательна.

**Учредитель**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053

**Издатель**

ООО «Издательский центр РИОР»

ул. Полярная, д. 31в, стр. 1, Москва, 127214

№ рег. СМИ: ПИ № ФС77-64134 от 25.12.2015

**Главный редактор:** Вольвач А. Е.



