

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ и РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

2026

Том 9

№ 3

Журнал основан в 2018 г.

Выходит 6 раз 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 обсерватории РАН (Крым, Россия)

Заместитель главного редактора

Ермолов Павел Петрович — кандидат технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» инженерного факультета Высшей технологической школы «Севастопольский приборостроительный институт» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» (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 «Радиоэлектроника и телекоммуникации» инженерного факультета Высшей технологической школы «Севастопольский приборостроительный институт» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» (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)

Зинченко Игорь Иванович — заведующий отделом радиоприемной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии 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)

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)

Руденко Константин Васильевич — доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории физики и технологий приборов нанoeлектроники НИЦ «Курчатовский институт» — ФТИАН им. К. А. Валиева, профессор НИУ МФТИ (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)

Чаусов Денис Николаевич — доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией фотоники и органической электроники Центра биофотоники Института общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (Москва, Россия)

Широков Игорь Борисович — доктор технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» инженерного факультета Высшей технологической школы «Севастопольский приборостроительный институт» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» (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 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» (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)

Обухов И. А. Динамическая темная энергия и «напряжение Хаббла»	367
Вольвач А. Е., Дмитроца А. И., Неяченко Д. И. Геодезические ограничения сейсмического потенциала Крымского полуострова	397

Электроника, фотоника, приборостроение и связь (2.2)

Азарнов Н. В., Кашицын С. Д., Михайлов П. О., Обухов И. А. Некоторые проблемы автономной навигации наземной транспортной платформы	417
Мелёшин Ю. М. Алгоритм междолюционной обработки сигналов в ММО радиолокаторах	434
Мелёшин Ю. М., Лавриненко А. Д., Съедин Е. М., Безруков И. А. Аппаратная реализация алгоритма со знакопеременным накоплением в ММО радиолокаторах	451
Мордвинова А. Ю., Широков И. Б. Комплексный подход к повышению скорости передачи данных в современных беспроводных и спутниковых системах связи	463

История науки и техники (5.6.6)

Рахмани Д. Эволюция технологий связи и управления в электроэнергетике Ирана: историко-технический анализ доцифровой эпохи	476
Ермолов П. П., Катеринчук В. И., Слёзкин Г. В. История создания радиотехнических систем ближней навигации в НИИ-33 — ВНИИРА (1951—2005 гг.)	493
Пестриков В. М. Ламповые триоды Кавендишской лаборатории и других Британских компаний	523
Ермолов П. П. История испытаний систем радиолокации на Черноморском флоте. РЛС в составе управления ракетным оружием	547

INFOCOMMUNICATIONS and RADIO TECHNOLOGIES

2026

Vol. 9

No. 3

The journal was founded in 2018
Published 6 times a year

Honorary Chief Editor

Gulyaev Yuri 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)

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

Yermolov Pavel Petrovich – Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department “Radio electronics and telecommunications” of Faculty of Engineering Higher Technological School “Sevastopol Instrument-Making Institute” of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “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 “Radio electronics and telecommunications” of Faculty of Engineering Higher Technological School “Sevastopol Instrument-Making Institute” of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Sevastopol State University” (Sevastopol, Russia)

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

Bichurin 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)

Bogatryov Yuri Vladimirovych – 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)

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

Zapevalov Vladimir Yevgenyevich – 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)

Zinchenko Igor Ivanovich – Head of the Department of Radio Receiving Equipment and Millimeter Radio Astronomy 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)

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

Ipatov Aleksandr Vasilyevich – 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)

Malyutin Nikolay Dmitriyevich – 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 Andreyevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy General Director for Research, Radiotekhnika Co. (Moscow, Russia)

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

Pestrikov Victor Mikhaylovich – 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 Alexandr 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)

Rudenko Konstantin Vasilyevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory of Physics and Technologies of Nanoelectronics Devices of the National Research Center “Kurchatov Institute – K. A. Valiev Institute of Physics and Technology of the Russian Academy of Sciences, Professor of the National Research University Moscow Institute of Physics and Technology (Moscow, Russia)

Sovlukov Alexandr Sergeyevich – 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)

Chausov Denis Nikolayevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Laboratory of Photonics and Organic Electronics of the Biophotonics Center of the Institute of General Physics named after. A. M. Prokhorov Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Shirokov Igor Borisovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department “Radio electronics and telecommunications” of Faculty of Engineering Higher Technological School “Sevastopol Instrument-Making Institute” of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “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)

Evstigneyev Maksim Pavlovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research, of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Sevastopol State University” (Sevastopol, Russia)

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

Novikov Vladimir Vitalyevich – 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
Website: <https://www.sevsu.ru/icrt>

Contents

Physical sciences

I. A. Obukhov Dynamical Dark Energy and “Hubble Tension”	367
A. E. Volvach, A. I. Dmitrotsa, and D. I. Neyachenko Geodetic Constraints on the Seismic Potential of the Crimean Peninsula	397

Electronics, photonics, instrumentation and communications

N. V. Azarnov, S. D. Kashitsyn, P. O. Mikhailov, and I. A. Obukhov Some Problems of Ground Transportation Platform Autonomous Navigation	417
Yu. M. Meleshin Intermodulation Signal Processing Algorithm in MIMO Radars	434
Y. M. Meleshin, A. D. Lavrinenko, E. M. Syedin, and I. A. Bezrukov Hardware Implementation of an Alternating-Sign Accumulation Algorithm in MIMO Radars	451
A. Yu. Mordvinova and I. B. Shirokov A Comprehensive Approach to Increasing Data Transmission Rates in Modern Wireless and Satellite Communication Systems	463

History of science and technology

J. Rahmani The Evolution of Communications and Control Technologies in the Iranian Electric Power Industry: A Historical and Technical Analysis of the Pre-Digital Era	476
P. P. Yermolov, V. I. Katerinchuk, and G. V. Slyozkin History of the Development of Short-Range Radio Navigation Systems at Research Institute 33 – VNIIRA (1951–2005)	493
V. M. Pestrikov Tube Triodes of the Cavendish Laboratory and Other British Companies	523
P. P. Yermolov History of Testing of Radar Systems in the Black Sea Fleet. Radar as Part of Missile Weapons Control	547

Динамическая темная энергия и «напряжение Хаббла»¹

^{1,2} Обухов И. А.

¹ Научно-производственное предприятие «Радиотехника»
ул. акад. Челомея, д. 3, корп. 2, г. Москва, 117630, Российская Федерация

² Филиал РТУ МИРЭА в г. Фрязино
ул. Вокзальная, д. 2а, Московская область,
г. Фрязино, 141190, Российская Федерация

ia@npprt.ru

Получено: 6 января 2026 г.

После доработки: 25 февраля 2026 г.

Отрецензировано: 2 марта 2026 г.

Принято к публикации: 2 марта 2026 г.

Аннотация: Предложена модель, в которой динамическая темная энергия образовалась в некоторый момент времени в результате большой флуктуации концентрации в электронейтральной плазме спинорных квазичастиц и антиквазичастиц, взаимодействующих со случайным электромагнитным полем. Рассмотрены эволюция плотности темной энергии и связанных с нею величин, таких как параметр Хаббла и ускорение расширения Вселенной. Показано, что модель позволяет объяснить так называемое «напряжение Хаббла», а также замедление ускорения расширения Вселенной в настоящее время.

Ключевые слова: квазичастицы, антиквазичастицы, случайное электромагнитное поле, вакуумоподобная плазма, электронейтральность, флуктуация, энтропия, постоянная Хаббла, «напряжение Хаббла».

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Обухов И. А. Динамическая темная энергия и «напряжение Хаббла» // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2026. Т. 9, № 2. С. 367—396.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Обухов, И. А. Динамическая темная энергия и «напряжение Хаббла» / И. А. Обухов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2026. — Т. 9, № 3. — С. 367—396.

¹ Публикуется в порядке дискуссии.

1. Введение

Согласно современным теоретическим представлениям [1—4] и данным астрономических наблюдений [5—12], в настоящее время Вселенная в целом является плоской и расширяется с ускорением. Космологические модели, основанные на общей теории относительности (ОТО) [1, 3, 4], допускают плоскую Вселенную только при средней плотности вещества, равной критической

$$\rho^{(c)}(t) = 3H(t)^2/8\pi G, \quad (1)$$

где: t — время, отсчитываемое от момента образования Вселенной (Большого Взрыва); $H(t)$ — параметр Хаббла; G — гравитационная постоянная. В настоящее время $t = t_0$ критическая плотность

$$\rho^{(c)}(t_0) = \rho_0^{(c)} \sim 10^{-29} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}.$$

Наблюдаемая средняя плотность обычной материи составляет в наше время только 4—5 % от $\rho_0^{(c)}$. Остальную часть критической плотности приписывают так называемой скрытой массе, которую разделяют на темную материю (примерно 22—27 % от $\rho_0^{(c)}$) и темную энергию (68—74 % от $\rho_0^{(c)}$). Неопределенность в величинах связана с неопределенностью в значении постоянной Хаббла (параметра Хаббла; в настоящее время $H_0 = H(t_0)$), которая, по данным различных современных источников [7—9], изменяется от $66,82 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ до $77,10 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ (или от $2,165 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$ до $2,499 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$).

Вклад темной энергии в общую плотность вещества во Вселенной является наибольшим, и именно с ее наличием связывают ускоренное расширение Вселенной [2, 3]. При этом темной энергии приписывают специфические свойства: она равномерно и изотропно заполняет Вселенную и не вступает ни в какие взаимодействия с другими видами материи, кроме гравитационного. Эти особенности делают логичной гипотезу о связи темной энергии с энергией вакуума элементарных частиц [13, 14].

Уравнения Эйнштейна, описывающие пространство-время в присутствии материи, имеют вид [15]

$$R_{\mu\nu} - (1/2)g_{\mu\nu}R = (8\pi G/c^4)T_{\mu\nu}. \quad (2)$$

Здесь: $R_{\mu\nu}$ — тензор Риччи, $R = g^{\mu\nu}R_{\mu\nu}$ — скалярная кривизна пространства-времени, $g^{\mu\nu}$ — метрический тензор с сигнатурой (+, −, −, −), c — скорость света в вакууме, $T_{\mu\nu}$ — тензор энергии-импульса материи. По повторяющимся верхним и нижним индексам подразумевается суммирование, индексы пробегает значения от 0 до 3. В случае плоского пространства-времени метрический тензор $g^{\mu\nu}$ переходит в тензор Минковского $\eta^{\mu\nu}$ с диагональю (1, −1, −1, −1).

Тензор энергии-импульса материи можно представить в виде

$$T_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}^{(m)} + T_{\mu\nu}^{(\Lambda)}, \quad (3)$$

где

$$T_{\mu\nu}^{(\Lambda)} = g_{\mu\nu}\varepsilon^{(\Lambda)}. \quad (4)$$

Тензор $T_{\mu\nu}^{(m)}$ описывает обычную и темную материю, а $T_{\mu\nu}^{(\Lambda)}$ — темную энергию. Знак правой части формулы (4) зависит от выбора сигнатуры метрического тензора и определяется требованием неотрицательности компоненты $T_{00}^{(\Lambda)}$ при неотрицательной $\varepsilon^{(\Lambda)}$. Определив космологическую постоянную соотношением

$$\Lambda = \varepsilon^{(\Lambda)}(8\pi G/c^4), \quad (5)$$

из (2) получим уравнения Эйнштейна с космологическим членом [1]

$$R_{\mu\nu} - (1/2)g_{\mu\nu}R - \Lambda g_{\mu\nu} = (8\pi G/c^4)T_{\mu\nu}^{(m)}, \quad (6)$$

который, очевидно, обращается в нуль, если $\varepsilon^{(\Lambda)} = 0$.

Плотность энергии ε и давление p среды, описываемой тензором энергии-импульса $T_{\mu\nu}$, связаны с его компонентами соотношениями

$$\varepsilon = cT^{00}, p = -(c/3)(T^\mu_\mu - T^0_0). \quad (7)$$

Отсюда и из выражения (4) в случае плоского пространства-времени получим релятивистски инвариантное [13] выражение

$$\varepsilon^{(\Lambda)} = -p^{(\Lambda)}, \quad (8)$$

означающее равенство нулю плотности энтальпии

$$h^{(\Lambda)} = \varepsilon^{(\Lambda)} + p^{(\Lambda)} = 0. \quad (9)$$

В принятой сейчас стандартной космологической модели, называемой Λ CDM-моделью [2, 3, 16], не изменяющаяся со временем однородная, изотропная и электронейтральная среда с нулевой плотностью энтальпии, взаимодействующая с остальной материей только гравитационно, заполняющая все плоское пространство, при условии

$$\varepsilon^{(\Lambda)} > (\varepsilon^{(m)} + 3p^{(m)})/2 \quad (10)$$

обеспечивает ускоренное расширение Вселенной и компенсирует недостаток плотности остальной материи. Ее отождествляют с темной энергией. Поскольку для обычной и темной материи величины $\varepsilon^{(m)}$ и $p^{(m)}$ неотрицательны, то плотность темной энергии $\varepsilon^{(\Lambda)}$ согласно (10) должна быть положительной.

По-видимому, впервые материальная среда, обладающая перечисленными свойствами, теоретически исследовалась в 1965 г. Э. Б. Глинером [17]. Поэтому ее иногда называют вакуумом Глинера.

В 1968 г. Я. Б. Зельдович в статье [13] подробно обсудил проблему Λ -члена в уравнениях Эйнштейна и выдвинул гипотезу о его вакуумной природе. Он показал, что энергия и давление вакуумов скалярных частиц и фермионов удовлетворяют соотношению (8) и дал численную оценку этих вкладов в плотность

$$\rho^{(\Lambda)} = \varepsilon^{(\Lambda)}/c^2 \quad (11)$$

и постоянную Λ . Величины оказались на 46 порядков больше, чем допустимые значения, не противоречащие астрономическим данным. Однако это обстоятельство не опровергает гипотезу, поскольку учет суммарного вклада всех типов частиц мог бы дать и правильный результат [14]. Такие расчеты в рамках стандартной модели элементарных частиц до сих пор не проведены.

В научной печати обсуждается множество различных точек зрения на причины ускоренного расширения Вселенной и природу темной энергии [3, 4, 16, 18—23]. Рассматриваются модели, выходящие за рамки ОТО [21, 22]; модели, связывающие ускоренное расширение Вселенной с наличием скалярного поля специального вида [3, 4, 16]; со свойствами нейтрино [3], включая нейтрино с отрицательной массой [23] и т. д.

Новые астрономические данные постоянно подогревают интерес к проблеме темной энергии. Недавно опубликованные результаты коллаборации *DESI* (*Dark Energy Spectroscopic Instrument*) [10—12], из которых следует, что, возможно, ускорение расширения Вселенной уменьшается со временем [16, 18—20], еще раз подтверждают недостаточность наших знаний об эволюции Вселенной.

Также до сих пор не ясны причины так называемого «напряжения Хаббла»: различных значений для постоянной Хаббла H_0 , получаемых при анализе данных о «поздней» Вселенной и данных о флуктуациях реликтового излучения и акустических барионных колебаниях в «ранней» Вселенной [7—12, 18—22].

В настоящей статье для объяснения результатов астрономических наблюдений привлекается гипотеза, в которой темная энергия представляет собой вакуумоподобную плазму спинорных квазичастиц, взаимодействующих со случайным электромагнитным полем [24—26]. Эта плазма образовалась приблизительно 4,8 млрд. лет назад, и ее плотность медленно уменьшается с ростом времени.

2. Вакуумоподобная плазма и постоянная Хаббла

В работах [24—26] построена модель, в которой гипотетическое спинорное поле $\Phi(x)$, имеющее массу и электрический заряд такие же, как

у электрона, взаимодействует с детерминированным и случайным электромагнитными полями. При определенных условиях в результате взаимодействия спинорного и случайного электромагнитного полей может сформироваться материальная среда с нулевой плотностью энтальпии, которую будем называть вакуумоподобной Φ -плазмой. В отличие от темной энергии Λ CDM-модели плотность энергии и давление такой плазмы могут изменяться со временем. Соответственно, величина Λ , определенная формулой (5), уже не будет постоянной. Плотность этой среды $\rho^{(\Lambda)}$ является функцией ее температуры T_Λ и при $T_\Lambda \sim 10^{-5} \text{ K}$ составляет около 10^{-29} г/см^3 , то есть соответствует плотности темной энергии [7—9].

Вакуумоподобная Φ -плазма является электронейтральной и состоит из спинорных квазичастиц и антиквазичастиц, взаимодействующих посредством случайного электромагнитного поля. Она является однородной и изотропной и заполняет всю Вселенную. Квазичастицы и антиквазичастицы распределены по энергиям в соответствии со статистикой Ферми — Дирака и описываются температурой T_Λ и химическими потенциалами $F^{(e)}$ и $F^{(h)}$ соответственно, для которых выполнены соотношения

$$F^{(e)} = -F^{(h)} = F_\Lambda, \quad (12)$$

обеспечивающие электронейтральность.

При этом плазма оказывается химически неравновесной. Она становится вакуумоподобной, когда ее температура и химический потенциал связаны соотношением

$$\int p'^2 dp' (1 + \exp\{(p'^2 - p_\Lambda^2)/2m\theta_\Lambda\})^{-1} \\ [1 - (4\alpha/3\pi mc) \int p^2 dp \theta (p'^2 - p^2)(p^2 + p'^2)^{-1} \\ (1 + \exp\{-(p^2 - p_\Lambda^2)/2m\theta_\Lambda\})^{-1}] = 0. \quad (13)$$

Здесь:

$$\theta_\Lambda = k_B T_\Lambda, \quad (14)$$

$$p_\Lambda = [2m(F_\Lambda - mc^2)]^{1/2}, \quad (15)$$

m — масса электрона, $\alpha = e^2/\hbar c$ — постоянная тонкой структуры, $\hbar$ — приведенная постоянная Планка.

Отсюда следуют уравнение состояния вакуумоподобной плазмы

$$p^{(\Lambda)}(F_\Lambda, \theta_\Lambda) = -mc^2 n^{(\Lambda)}(F_\Lambda, \theta_\Lambda) \quad (16)$$

и формула для плотности ее энергии

$$\varepsilon^{(\Lambda)}(F_\Lambda, \theta_\Lambda) = mc^2 n^{(\Lambda)}(F_\Lambda, \theta_\Lambda) > 0, \quad (17)$$

где

$$n^{(\Lambda)}(F_\Lambda, \theta_\Lambda) = 8\pi(2\pi\hbar)^{-3} \int p^2 dp (1 + \exp\{(p^2 - p_\Lambda^2)/2m\theta_\Lambda\})^{-1}. \quad (18)$$

— концентрация квазичастиц и антиквазичастиц в плазме.

При условиях

$$F_{\Lambda} > mc^2, p_{\Lambda}^2/2m \ll \Theta_{\Lambda} \ll mc^2 \quad (19)$$

уравнение (13) можно приближенно представить в виде

$$p_{\Lambda}^3 \approx \alpha(4/\pi - 1)(\Theta_{\Lambda}/mc^2)^2(mc)^3. \quad (20)$$

Впервые это выражение было получено в работе [24]. Для концентрации квазичастиц в плазме будет справедлива приближенная формула

$$n^{(\Lambda)}(\Theta_{\Lambda}) \approx \alpha(8\pi/3)(4/\pi - 1)(\Theta_{\Lambda}/mc^2)^2(mc/2\pi\hbar)^3. \quad (21)$$

При получении соотношений (20) и (21) в выражениях для плотности энергии и давления случайного электромагнитного поля были отброшены малые слагаемые порядка $\alpha mc^2(mc/\hbar)^3(p_{\Lambda}/mc)^6$. Их учет приводит к появлению дополнительного к (21) корня уравнения (13)

$$n^{(\Lambda)} \approx (4\alpha\pi)^{-1}(mc/\hbar)^3 \approx 1,9 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-3} \text{ и } \rho^{(\Lambda)} \approx 1,7 \cdot 10^5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}.$$

Если вместо массы электрона сюда подставить массу протона, то получим результат Я. Б. Зельдовича 1968 года [13].

Плазма спинорных квазичастиц и антиквазичастиц при температуре, определяемой уравнением (13), становится релятивистски инвариантной вакуумоподобной материальной средой. При этом квазичастицы и антиквазичастицы находятся в температурном равновесии, но далеки от состояния химического равновесия. Разность их химических потенциалов можно оценить, как

$$F^{(e)} - F^{(h)} = 2F_{\Lambda} = 2mc^2 + p_{\Lambda}^2/m \approx \\ \approx 2mc^2[1 + (1/2)(\alpha(4/\pi - 1)(\Theta_{\Lambda}/mc^2)^2)^{2/3}]. \quad (22)$$

Взаимодействие между спинорным и случайным электромагнитным полями в рассматриваемой плазме нельзя считать малым. Его вклады в плотность энергии $\varepsilon^{(sf,\Lambda)}$ и давление $p^{(sf,\Lambda)}$ вакуумоподобной Φ -плазмы даются выражениями

$$\varepsilon^{(sf,\Lambda)} = 3mc^2 n^{(\Lambda)}, p^{(sf,\Lambda)} = -mc^2 n^{(\Lambda)}. \quad (23)$$

По абсолютной величине они превосходят соответствующие вклады квазичастиц.

Свойства Φ -плазмы при температуре T_{Λ} позволяют рассматривать ее в качестве кандидата на роль темной энергии. Плотность темной энергии $\rho^{(\Lambda)}$ порядка $10^{-29} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ ($\Lambda \sim 10^{-56} \text{ см}^{-2}$) [1, 7, 8]. Используя эту оценку, получим:

$$T_{\Lambda} \sim 10^{-50} K, p_{\Lambda} \sim 10^{-28} \text{ г} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^{-1}, v_{\Lambda} = p_{\Lambda}/m \sim 1 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}, n^{(\Lambda)} \sim 10^{-2} \text{ см}^{-3}.$$

Оставив пока в стороне вопросы о возможных механизме и сценарии образования вакуумоподобной Φ -плазмы, рассмотрим ее эволюцию, предполагая, что она возникла в некоторый момент времени t_Λ , отсчитываемый от момента Большого Взрыва. Как показано в [25, 26], для концентрации Φ -плазмы при $t \geq t_\Lambda$ можно получить уравнение

$$dn^{(\Lambda)}(t)/dt = -\omega^{(sh;e,h)}(n^{(\Lambda)}(t))^2(1 - \exp\{-2F_\Lambda(t)/\Theta(t)\}), \quad (24)$$

в котором

$$\omega^{(sh;e,h)} \approx c\pi(e^4/9m^2c^4) = c\pi(r_0/3)^2, \quad (25)$$

а $r_0 = e^2/mc^2$ - классический радиус электрона.

Предполагая, что

$$n^{(\Lambda)}(t)|_{t=t_\Lambda} = n_0^{(\Lambda)}, \quad (26)$$

и пренебрегая членами, пропорциональными $\exp\{-2F_\Lambda(t)/\Theta(t)\}$, получим решение задачи Коши (24), (26)

$$n^{(\Lambda)}(t)|_{t \geq t_\Lambda} \approx n_0^{(\Lambda)} / [1 + n_0^{(\Lambda)} \omega^{(sh;e,h)}(t - t_\Lambda)]. \quad (27)$$

Для времен t , удовлетворяющих неравенству

$$t - t_\Lambda \gg \tau_{st} = 1/n_0^{(\Lambda)} \omega^{(sh;e,h)}, \quad (28)$$

справедливо соотношение

$$n^{(\Lambda)}(t) \approx 1/\omega^{(sh;e,h)}(t - t_\Lambda). \quad (29)$$

Эта асимптотика решения (27) не зависит от начального условия. Поэтому τ_{st} является временем стохастизации плазмы, за которое она «забывает» свое начальное состояние. Из требования $\tau_{st} \ll H_0^{-1}$ получим

$$n_0^{(\Lambda)} \gg H_0/\omega^{(sh;e,h)} \sim 10^{-2} \text{ см}^{-3}. \quad (30)$$

Пусть для момента времени t_0 выполнены неравенства:

$$t > t_0 > t_\Lambda.$$

Представим формулу (29) в виде

$$n^{(\Lambda)}(t) \approx 1/[\omega^{(sh;e,h)}(t_0 - t_\Lambda)(1 + (t - t_0)/(t_0 - t_\Lambda))]. \quad (31)$$

Предположим, что в настоящее время общее число квазичастиц N в Φ -плазме изменяется медленно, а изменение концентрации связано, прежде всего, с изменением объема Вселенной V , обусловленного ее расширением

$$|N^{-1}dN/dt| \ll |V^{-1}dV/dt| = 3H_0.$$

В этом случае для промежутков времени, удовлетворяющих неравенствам

$$0 \leq t - t_0 \ll (3H_0)^{-1} \sim 4,8 \text{ млрд. лет}$$

справедливы оценки

$$dn^{(\Lambda)}(t)/dt \approx -3H_0 n^{(\Lambda)}(t), n^{(\Lambda)}(t) \approx n^{(\Lambda)}(t_0).$$

Подставляя эти формулы в уравнение (24) в пределе $n_0^{(\Lambda)} \rightarrow \infty$, кроме тривиального решения получим

$$n_{\infty}^{(\Lambda)}(t_0) = 3H_0/\omega^{(sh;e,h)} = (27H_0/\pi e^4)(m^2 c^3). \quad (32)$$

Эта асимптотика соответствует устойчивой точке покоя нелинейного дифференциального уравнения для N при условии $F_{\Lambda}(t_0)/\Theta(t_0) \gg 1$ и, как и соотношение (29), не зависит от начального условия.

Сравнивая выражение (32) с формулой (29), найдем

$$t_0 - t_{\Lambda} \approx (3H_0)^{-1}, \quad (33)$$

а для концентрации и плотности плазмы получим

$$\begin{aligned} n^{(\Lambda)}(t) &= n_0^{(\Lambda)} / [1 + (n_0^{(\Lambda)} / n_{\infty}^{(\Lambda)}(t_0))(3H_0(t - t_{\Lambda}))], \\ \rho^{(\Lambda)}(t) &= \rho_0^{(\Lambda)} / [1 + (\rho_0^{(\Lambda)} / \rho_{\infty}^{(\Lambda)}(t_0))(3H_0(t - t_{\Lambda}))], \end{aligned} \quad (34)$$

где: $\rho^{(\Lambda)} = mn^{(\Lambda)}$, $\rho_0^{(\Lambda)} = mn_0^{(\Lambda)}$, $\rho_{\infty}^{(\Lambda)} = mn_{\infty}^{(\Lambda)}$.

Промежуток времени $t_0 - t_{\Lambda} \approx 4,8$ млрд. лет отделяет наше время от момента образования темной энергии и, следовательно, от начала ускоренного расширения Вселенной. Эта оценка согласуется с современными астрономическими данными [2, 16].

Для концентрации вакуумоподобной плазмы в текущий момент времени при условии полной стохастизации справедливо выражение (29), из которого следует

$$\begin{aligned} \rho_{\infty}^{(\Lambda)}(t_0) &\approx (H_0/\pi e^4)(3mc)^3, \Lambda_{\infty}(t_0) \approx 216GH_0 cm^3/e^4, \\ \Omega_{\infty}^{(\Lambda)}(t_0) &= \rho_{\infty}^{(\Lambda)}(t_0)/\rho_0^{(c)} \approx 72G(mc)^3/H_0 e^4. \end{aligned} \quad (35)$$

Время стохастизации вакуумоподобной Φ -плазмы зависит от ее концентрации $n_0^{(\Lambda)}$ (или плотности $\rho_0^{(\Lambda)}$) в момент времени t_{Λ} . На рис. 1 показано изменение плотности $\rho^{(\Lambda)}$ от времени, рассчитанное на основании выражения (27), при трех различных $\rho_0^{(\Lambda)}$. Видно, что τ_{st} может быть достаточно большим и при малых $\rho_0^{(\Lambda)}$ достигать миллиарда лет. Плотность вакуумоподобной Φ -плазмы уменьшается со временем, что согласуется с интерпретациями последних астрономических измерений [16, 19], как указывающих на уменьшение со временем ускорения расширения Вселенной.

В таблице 1 приведены характеристики плазмы в настоящее время при различных $\rho_0^{(\Lambda)}$ и H_0 . С учетом разброса в экспериментальных значе-

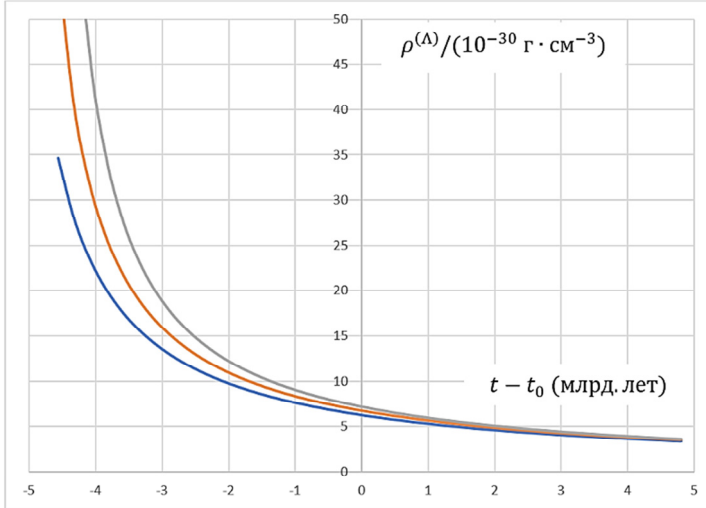


Рис. 1. Зависимость $\rho^{(\Lambda)}$ от времени при $H_0 = 67,89 \text{ км с}^{-1}\text{Мпк}^{-1}$ и $\rho_0^{(\Lambda)} = 4,55 \cdot 10^{-29} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, $9,10 \cdot 10^{-29} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$; $9,10 \cdot 10^{-28} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ (кривые снизу вверх), начало координат соответствует настоящему времени.

Fig. 1. Dependence of density $\rho^{(\Lambda)}$ from the time when $H_0 = 67,89 \text{ км с}^{-1}\text{Мпк}^{-1}$ and $\rho_0^{(\Lambda)} = 4,55 \cdot 10^{-29} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$; $9,10 \cdot 10^{-29} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$; $9,10 \cdot 10^{-28} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ (curves from bottom to top), origin of coordinates correspond to the present time

ниях постоянной Хаббла, даваемых разными источниками [7—9], рассчитанные величины не противоречат астрономическим наблюдениям [16, 19].

Табл. 1. Характеристики вакуумоподобной плазмы в настоящее время $\Omega^{(\Lambda)}(t_0) = \rho^{(\Lambda)}(t_0)/\rho_0^{(c)}$.

Table 1. Characteristics of vacuumlike plasma at the present time $\Omega^{(\Lambda)}(t_0) = \rho^{(\Lambda)}(t_0)/\rho_0^{(c)}$

H_0 (км с ⁻¹ Мпк ⁻¹)	$\rho_0^{(\Lambda)} \rightarrow \infty$		$\rho_0^{(\Lambda)} = 4,55 \cdot 10^{-29} \text{ г/см}^3$		$\rho_0^{(\Lambda)} = 9,10 \cdot 10^{-29} \text{ г/см}^3$		$\rho_0^{(\Lambda)} = 9,10 \cdot 10^{-28} \text{ г/см}^3$	
	$\rho_{\infty}^{(\Lambda)}(t_0)$ (10 ⁻³⁰ г/см ³)	$\Omega_{\infty}^{(\Lambda)}(t_0)$	$\rho^{(\Lambda)}(t_0)$ (10 ⁻³⁰ г/см ³)	$\Omega^{(\Lambda)}(t_0)$	$\rho^{(\Lambda)}(t_0)$ (10 ⁻³⁰ г/см ³)	$\Omega^{(\Lambda)}(t_0)$	$\rho^{(\Lambda)}(t_0)$ (10 ⁻³⁰ г/см ³)	$\Omega^{(\Lambda)}(t_0)$
66,82	7,11	0,847	6,15	0,733	6,59	0,786	7,05	0,841
67,89	7,23	0,834	6,23	0,720	6,69	0,773	7,17	0,827
77,10	8,20	0,734	6,95	0,622	7,53	0,674	8,13	0,728

Отметим, что в статье [31] получено выражение, связывающее постоянную Хаббла с фундаментальными физическими константами

$$H_0 = G\hbar/r_0^3 c^2 2^{1/2} = G\hbar m^3 c^4 / e^6 2^{1/2} \approx 2,48 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}.$$

В него, как и в представленные здесь формулы, входят масса электрона и элементарный заряд. Подставив это H_0 в соотношение (32), найдем

$$\rho^{(\Lambda)}(t_0) = 27G\hbar m^6 c^7 / 2^{1/2} \pi e^{10} \approx 8,15 \cdot 10^{-30} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}.$$

Также, как значения для $\rho^{(\Lambda)}$ из таблицы 1, эта величина согласуется с экспериментальными данными в пределах неопределенности астрономических измерений.

3. Параметр Хаббла в будущем

Используя полученное соотношение для плотности вакуумоподобной плазмы, можно рассчитать зависимость параметра Хаббла и связанных с ним величин от времени при $t > t_\Lambda$. Метрику пространства Фридмана определим обычным выражением [1] для дифференциала квадрата интервала

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2 (dr', dr') / [1 + (k/4)(r', r')]^2, \quad (36)$$

где: a — масштабный фактор; $r' = r/a$, величина k принимает значения 0, 1 и -1 , соответствующие плоской, замкнутой и открытой Вселенным.

Из уравнений Эйнштейна [1,15] при $t > t_\Lambda$ получим:

$$a^{-1} d^2 a / dt^2 = (8\pi G / 3c^2) [\varepsilon^{(\Lambda)} - (\varepsilon^{(m)} + 3p^{(m)}) / 2], \quad (37)$$

$$(da/dt)^2 = (8\pi G / 3c^2) (\varepsilon^{(\Lambda)} + \varepsilon^{(m)}) a^2 - kc^2. \quad (38)$$

Здесь $\varepsilon^{(m)}$ и $p^{(m)}$ — плотность энергии и давление всех видов материи кроме вакуумоподобной плазмы (темной энергии). При всех k уравнения (37) и (38) связаны тождеством

$$d\varepsilon/dt + 3a^{-1} (da/dt) (\varepsilon + p) = 0, \quad (39)$$

в котором $\varepsilon = \varepsilon^{(\Lambda)} + \varepsilon^{(m)}$, $p = p^{(\Lambda)} + p^{(m)}$.

Используя определения

$$H = a^{-1} da/dt, \Omega^{(\Lambda)} = \rho^{(\Lambda)} / \rho^{(c)}, \Omega^{(m)} = \rho^{(m)} / \rho^{(c)}, \quad (40)$$

$$\Omega^{(curv)} = -kc^2 / H^2 a^2$$

и пренебрегая вкладами релятивистского вещества (электромагнитного излучения и нейтрино), уравнения (37) и (38) при $t > t_\Lambda$ можно представить в виде

$$d^2 y / dx^2 = \Omega^{(\Lambda)}(x_0) (n^{(\Lambda)}(x) / n^{(\Lambda)}(x_0)) y - (1/2) \Omega^{(m)}(x_0) y^{-2}, \quad (40)$$

$$(H/H_0)^2 = \Omega^{(\Lambda)}(x_0) (n^{(\Lambda)}(x) / n^{(\Lambda)}(x_0)) + \Omega^{(m)}(x_0) y^{-3} + \Omega^{(curv)}(x_0) y^{-2}, \quad (41)$$

где: $y = a(x)/a(x_0)$, $x = H_0 t$, $x_0 = H_0 t_0$. В любой момент времени справедливо равенство

$$\Omega^{(\Lambda)} + \Omega^{(m)} + \Omega^{(curv)} = 1. \quad (42)$$

В далеком будущем, когда выполнены условия

$$a(t) \gg a(t_0) \text{ и } t - t_\Lambda \gg 1/H_0 \gamma^2 \approx 1,35 t_\Lambda \approx 13 \text{ млрд. лет,}$$

асимптотики решений уравнений (40), (41) имеют вид

$$y_\pm = A_\pm \exp\{\pm \gamma(x - 2/3)^{1/2}\}, \quad (43)$$

где

$$\gamma^2 = 96Gm/cH_0 r_0^2 \approx 1,11. \quad (44)$$

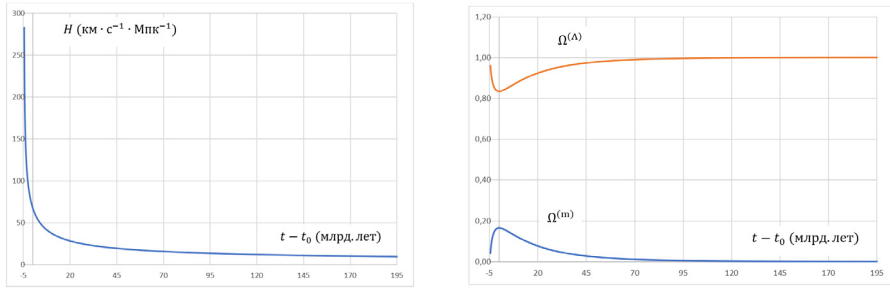


Рис. 2. Зависимость параметра Хаббла H при $k = 0$ (слева) и $\Omega^{(\Lambda)}, \Omega^{(m)}$ (справа) от времени при $t > t_\Lambda$, начало координат соответствует настоящему времени.

Fig. 2. Dependence of Hubble parameter H when $k = 0$ (left curve) and values $\Omega^{(\Lambda)}, \Omega^{(m)}$ (right curves) from the time when $t > t_\Lambda$, origin of coordinates correspond to the present time

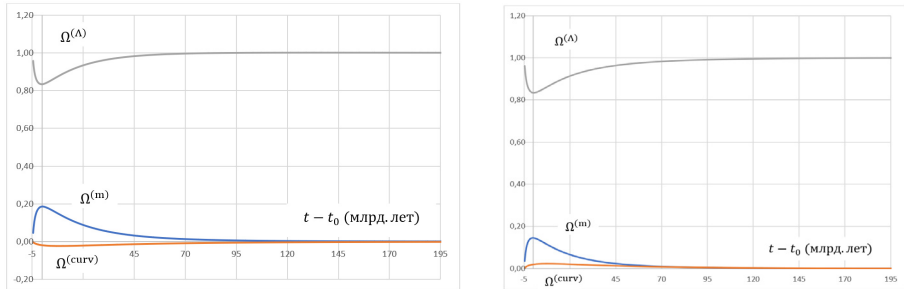


Рис. 3. Зависимости величин $\Omega^{(\Lambda)}, \Omega^{(m)}$ и $\Omega^{(curv)}$ от времени при $k = 1$ (слева) и $k = -1$ (справа), начало координат соответствует настоящему времени.

Fig. 3. Dependence of values $\Omega^{(\Lambda)}, \Omega^{(m)}$ and $\Omega^{(curv)}$ from the time when $k = 1$ (left curves) and when $k = -1$ (right curves), origin of coordinates correspond to the present time

В настоящее время Вселенная расширяется, и если никакие глобальные катаклизмы не изменят эту тенденцию, то справедлива асимптотика y_+ , то есть в рассматриваемой модели Вселенная будет расширяться неограниченно долго.

Зависимости параметра Хаббла, величин $\Omega^{(\Lambda)}$ и $\Omega^{(m)}$ от времени для случая плоской Вселенной ($k = 0$), начиная с момента времени $t_{\Lambda} + 240$ млн. лет, показаны на рис. 2, за начало отсчета принято настоящее время ($t = t_0$). В расчетах предполагалось, что

$$\Omega^{(\Lambda)}(t_0) = 0,834, \Omega^{(m)}(t_0) = 0,166.$$

Параметр Хаббла монотонно убывает с ростом времени, а отношения $\Omega^{(\Lambda)}$ и $\Omega^{(m)}$ ведут себя немонотонно, они имеют экстремумы при $t = t_0$. В далеком будущем $\Omega^{(\Lambda)}$ стремится к единице, а $\Omega^{(m)}$ — к нулю.

Графики для $\Omega^{(\Lambda)}$, $\Omega^{(m)}$ и $\Omega^{(curv)}$ в случаях замкнутой и открытой Вселенных при $|\Omega^{(curv)}(t_0)| = 0,02$ представлены на рис. 3. Они также немонотонны, $\Omega^{(\Lambda)}$ и $\Omega^{(m)}$ имеют экстремумы при $t = t_0$, а экстремумы $\Omega^{(curv)}$ сдвинуты в будущее на 8,65 и 7,69 млрд. лет соответственно. Поведение параметра Хаббла для замкнутой и открытой Вселенных аналогично показанному для плоской Вселенной на левом рис. 2. Во всех случаях на горизонте в 100 млрд. лет $\Omega^{(\Lambda)}$ превышает $\Omega^{(m)}$ и $\Omega^{(curv)}$ на три порядка и более, то есть темная энергия доминирует.

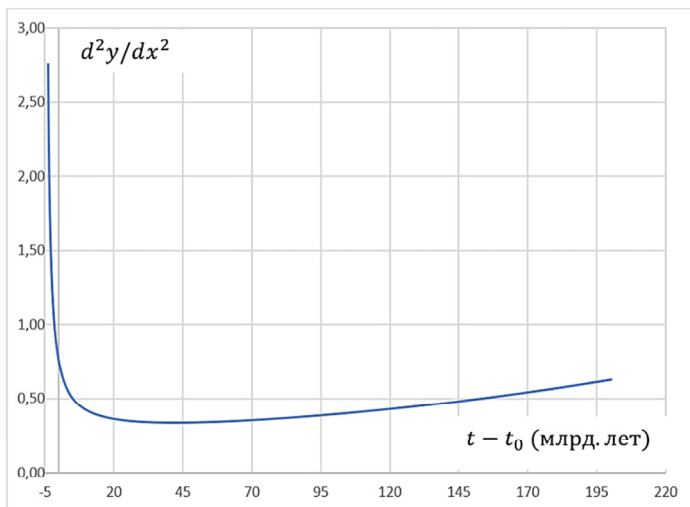


Рис. 4. Зависимость нормированного ускорения плоской Вселенной от времени при $t > t_{\Lambda}$.

Fig. 4. Dependence of normed flat Universe acceleration from the time when $t > t_{\Lambda}$

Ускорение расширения Вселенной

$$d^2a/dt^2 = a(t_0)H_0^2 d^2y/dx^2$$

определяется второй производной от y по x . Зависимость этой величины от времени при $k = 0$ показана на рис. 4. При $t > t_{\Lambda}$ ускорение всегда по-

ложительно. От момента t_Λ и примерно до 41,8 млрд. лет после настоящего времени оно убывает, что согласуется с результатами недавних астрономических наблюдений [10—12, 16, 18—20]. Затем ускорение расширения Вселенной начнет медленно возрастать. Аналогично ведут себя кривые для d^2y/dx^2 и при $k = \pm 1$.

В рамках рассматриваемой модели представляют особый интерес значения параметра Хаббла в прошлом, поскольку для них имеются данные астрономических измерений [19, 32]. Для вычисления H при $t \leq t_\Lambda$ необходимо знать зависимость от времени плотности энергии всех видов материи в этот период. Найти эту зависимость при временах, близких к t_Λ , можно только опираясь на возможный сценарий образования вакуумоподобной плазмы.

4. Сценарий образования вакуумоподобной плазмы

Предположим, что до момента времени t_F электронейтральная Φ -плазма равномерно заполняла Вселенную, находясь в температурном равновесии с окружающей средой, а образующие ее квазичастицы и антиквазичастицы находились в химическом равновесии. Это возможно только при нулевых химических потенциалах $F^{(e)} = F^{(h)} = 0$. Такая равновесная плазма не может быть вакуумоподобной [24—26]. Можно показать, что при временах близких, но меньших t_F она была холодной, нерелятивистской и невырожденной, имела практически нулевые концентрацию квазичастиц, давление и плотности энергии и энтальпии.

Предположим далее, что в момент времени

$$t_F = t_\Lambda - \Delta t_{AF}, 0 < \Delta t_{AF} \ll t_\Lambda \quad (45)$$

без изменения температуры произошла флуктуация химического потенциала плазмы до некоторого положительного значения $F_\Lambda(t_F)$, превышающего энергию покоя электрона mc^2 . Эта флуктуация вызвала соответствующую флуктуацию концентраций квазичастиц и антиквазичастиц Φ -плазмы до значений $n(t_F)$. Будем называть рассматриваемую флуктуацию большой, поскольку при $t = t_F$ энергия $k_B T$, где T — средняя температура Вселенной, была на восемь порядков меньше mc^2 и $F_\Lambda(t_F)$.

Для плотностей энергии, давления и энтальпии неравновесной вырожденной Φ -плазмы справедливы выражения

$$\varepsilon^{(pl,\Phi)} = 3mc^2 n^{(\Lambda)}(\Theta(t)) - 2mc^2 n(t), \quad (46)$$

$$p^{(pl,\Phi)} = -mc^2 n^{(\Lambda)}(\Theta(t)), \quad (47)$$

$$h^{(pl,\Phi)} = 2mc^2 [n^{(\Lambda)}(\Theta(t)) - n(t)], \quad (48)$$

где

$$n^{(\Lambda)}(\Theta) = (4\alpha/3\pi^3)(1 - 4/\pi)\xi^2 n_c, \quad (49)$$

$n_c = (mc/\hbar)^3$, $\xi = \Theta/mc^2$, а $n(t)$ определено выражением

$$n(t)|_{t \geq t_F} = n(t_F)/[1 + n(t_F)\omega^{(sh;e,n)}(t - t_F)], \quad (50)$$

аналогичным (27).

В формуле для плотности энергии (46) первое слагаемое положительно и определяется вкладом случайного электромагнитного поля, а второе отрицательно и представляет собой вклады квазичастиц и антиквазичастиц. Давление отрицательно и полностью определяется случайным электромагнитным полем, поскольку вклады в него квазичастиц и антиквазичастиц пренебрежимо малы [24, 26]. Представление (46—50) является следствием того, что в главном приближении плотность энергии и давление случайного электромагнитного поля определяются для вырожденной плазмы только температурой, а квазичастиц — химическим потенциалом.

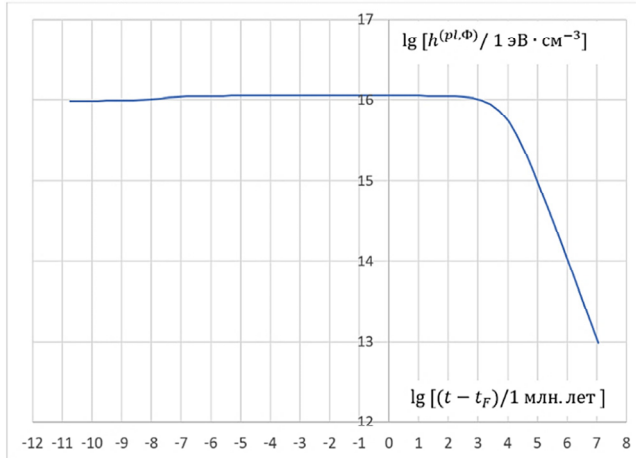


Рис. 5. Зависимость плотности энthalпии электронейтральной неравновесной Φ -плазмы от времени при $n^{(\Lambda)}(\Theta(t_F)) > n(t_F)$.

Fig. 5. Dependence of enthalpy density of electroneutrality nonequilibrium Φ -plasma from the time under condition $n^{(\Lambda)}(\Theta(t_F)) > n(t_F)$

Для того, чтобы неравновесная электронейтральная Φ -плазма стала вакуумоподобной, необходимо равенство нулю плотности ее энthalпии, которое согласно (48) обеспечивается равенством концентраций

$$n^{(\Lambda)}(\Theta(t)) = n(t). \quad (51)$$

До флуктуации энthalпия плазмы была отрицательной и близкой к нулю. После флуктуации знак $h^{(pl,\Phi)}$ определяется соотношением между $n^{(\Lambda)}(\Theta(t_F))$ и $n(t_F)$.

Если $n^{(\Lambda)}(\Theta(t_F)) > n(t_F)$, то плотность энталпии сразу после флуктуации положительна, как показано на рис. 5, и остается такой всегда (по крайней мере, до следующей большой флуктуации), поскольку концентрации квазичастиц и антиквазичастиц $n(t)$ релаксируют к равновесному значению, оставаясь меньше $n^{(\Lambda)}(\Theta)$.

Если же $n^{(\Lambda)}(\Theta(t_F)) < n(t_F)$, то плотность энталпии плазмы сразу после флуктуации отрицательна (см. рис. 6). Величина $n(t)$ также релаксирует к равновесному значению и через промежуток времени $\Delta t_{\Lambda F}$ концентрации $n^{(\Lambda)}(\Theta(t_F))$ и $n(t_F)$ сравниваются, как показано на рис. 7. В этот момент времени $t_{\Lambda} = t_F + \Delta t_{\Lambda F}$ плазма становится вакуумоподобной. Если $n(t_F) = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, то $\Delta t_{\Lambda F} \approx 8,4$ часа.

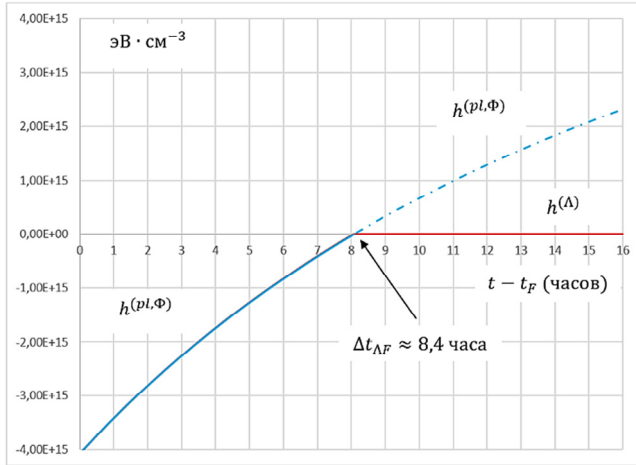


Рис. 6. Зависимость плотности энталпии электронейтральной неравновесной Φ -плазмы $h^{(pl,\Phi)}$ и вакуумоподобной плазмы $h^{(\Lambda)}$ от времени при $n^{(\Lambda)}(\Theta(t_F)) < n(t_F)$ и $n(t_F) = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

Fig. 6. Dependence of enthalpy density of electroneutrality nonequilibrium Φ -plasma $h^{(pl,\Phi)}$ and vacuum-like plasma $h^{(\Lambda)}$ from the time under condition $n^{(\Lambda)}(\Theta(t_F)) < n(t_F)$ when $n(t_F) = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$

Кроме условия $n^{(\Lambda)}(\Theta(t_F)) < n(t_F)$, необходимого для образования вакуумоподобной плазмы, есть еще ограничение

$$\varepsilon^{(\Lambda)} \geq -\varepsilon^{(m)} + 3kc^4/8\pi Ga^2, \quad (52)$$

обеспечивающее действительность постоянной Хаббла. С учетом малости правой части неравенства (52) при временах, близких к t_F получим

$$n^{(\Lambda)}(\Theta(t_F)) < n(t_F) \leq (3/2)n^{(\Lambda)}(\Theta(t_F)), \quad (53)$$

откуда следует оценка

$$1,1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3} < n(t_F) \leq 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}.$$

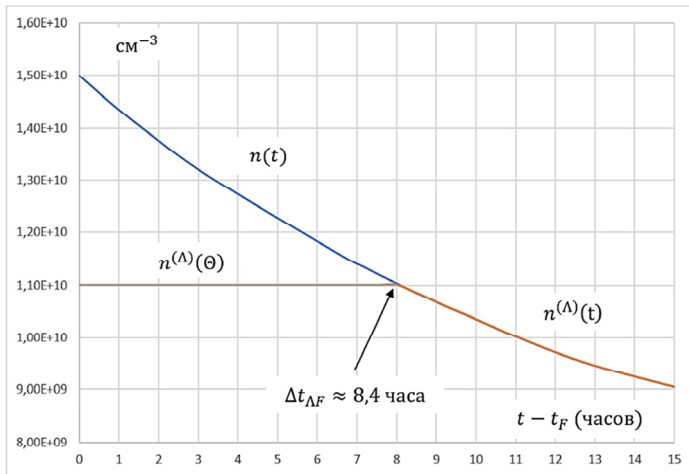


Рис. 7. Зависимость концентраций $n^{(\Lambda)}(\theta)$, $n(t)$ и плотности вакуумоподобной плазмы $n^{(\Lambda)}(t)$ от времени при $n(t_F) = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

Fig. 7. Dependence of concentrations $n^{(\Lambda)}(\theta)$, $n(t)$ and vacuum-like plasma concentration $n^{(\Lambda)}(t)$ from the time when $n(t_F) = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$

Состояние неравновесной электронейтральной Φ -плазмы с нулевой плотностью энthalпии является локально устойчивым. При фиксированной $n(t)$ и малом положительном отклонении разности концентраций $\delta n = n^{(\Lambda)}(\theta(t)) - n(t) > 0$ плотность энthalпии плазмы становится положительной, плазма отдает энергию окружающей среде, $n^{(\Lambda)}(\theta)$ уменьшается, и плазма возвращается в вакуумоподобное состояние. При $\delta n < 0$ величина $h^{(pl,\Phi)}$ становится отрицательной, плазма забирает энергию из окружающей среды, $n^{(\Lambda)}(\theta)$ увеличивается, и плазма вновь возвращается в вакуумоподобное состояние.

Из сказанного следует, что в момент времени $t_{\Lambda} = t_F + \Delta t_{\Lambda F}$ химически неравновесная электронейтральная Φ -плазма становится еще и температурно неравновесной с окружающей средой (Вселенной), превращается в вакуумоподобную, и остается таковой до времени полного затухания флуктуации, то есть десятки миллиардов лет. На рис. 6 показано поведение плотности энthalпии плазмы с учетом (сплошная линия) и без учета (штрихпунктирная линия) перехода в вакуумоподобное состояние. Плотность энthalпии Φ -плазмы при переходе в вакуумоподобное состояние остается непрерывной функцией температуры и времени, а ее производ-

ные по времени и температуре разрывны в точке перехода. Таким образом, рассматриваемый процесс является фазовым переходом второго рода [30].

Отправной точкой образования вакуумоподобного состояния вещества из невырожденной равновесной и электронейтральной Φ -плазмы с почти нулевой концентрацией квазичастиц является большая флуктуация их химического потенциала (или плотности). Возможна ли она, и каковы условия ее возникновения?

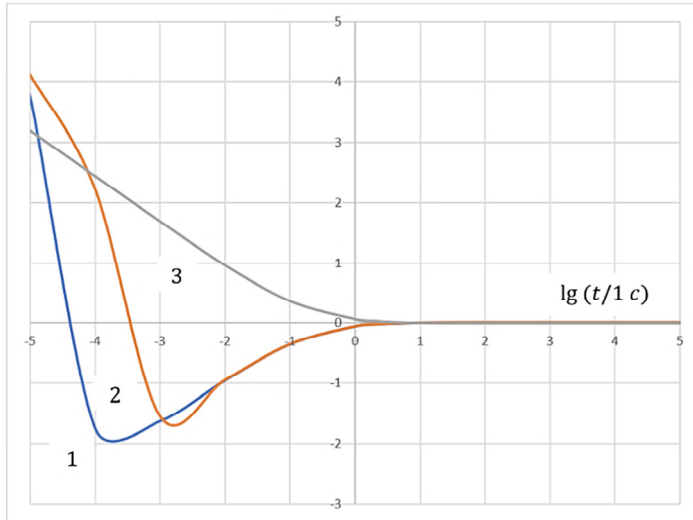


Рис. 8. Зависимость от времени величин: 1 — $\text{sign}(\varepsilon^{nd})\lg(1 + |\varepsilon^{nd}/2mc^2n_c|)$, 2 — $\text{sign}(h^{nd})\lg(1 + |h^{nd}/2mc^2n_c|)$, 3 — $\lg(1 + n^{(nd)}/n_c)$ для невырожденной равновесной электронейтральной Φ -плазмы.

Fig. 8. Dependence the values 1 — $\text{sign}(\varepsilon^{nd})\lg(1 + |\varepsilon^{nd}/2mc^2n_c|)$, 2 — $\text{sign}(h^{nd})\lg(1 + |h^{nd}/2mc^2n_c|)$, 3 — $\lg(1 + n^{(nd)}/n_c)$ from the time for non-degenerate equilibrium electroneutral Φ -plasma

Как уже отмечалось, до момента флуктуации Φ -плазма была равновесной, невырожденной и электронейтральной. Ее температура равнялась средней температуре Вселенной, а химические потенциалы спинорных квазичастиц и антиквазичастиц равнялись нулю. На рис. 8 в логарифмическом масштабе показаны зависимости от времени нормированных концентрации спинорных квазичастиц $n^{(nd)}$, плотности энергии $\varepsilon^{(nd)}$ и плотности энтальпии $h^{(nd)}$ такой плазмы. Видно, что начиная с десятой секунды после Большого Взрыва, все эти величины становятся очень малыми. Через сутки плотности энергии и энтальпии порядка 10^{-31} эВ·см $^{-3}$, а $n^{(nd)} \sim 10^{-55}$ см $^{-3}$.

Эволюция концентрации спинорных квазичастиц в неравновесной Φ -плазме описывается уравнением (24). Для полного количества этих квазичастиц во Вселенной получим

$$V^{-1}dN/dt = 3nH - n^2\omega^{(sh;e,h)}(1 - \exp\{-2F_\Lambda/\Theta\}). \quad (54)$$

Это уравнение имеет две точки покоя

$$n_1 = 0, n_2 = 3H/[\omega^{(sh;e,h)}(1 - \exp\{-2F_\Lambda/\Theta\})]. \quad (55)$$

Для равновесной электронейтральной плазмы $F_\Lambda = 0$, и вторая точка покоя исчезает. Уравнение становится линейным и, с учетом зависимости V от H , описывает состояние плазмы с некоторой постоянной концентрацией. Число квазичастиц в такой плазме возрастает с той же скоростью, с какой увеличивается объем Вселенной. Решение уравнения (54) вблизи точки $N_1 = n_1V$ при положительных H неустойчиво.

При любом сколь угодно малом положительном F_Λ существует точка покоя n_2 . Легко показать, что при положительных H решение уравнения (54) устойчиво в малой окрестности точки $N_2 = n_2V$. Даже малая флуктуация плотности квазичастиц Φ -плазмы (их химического потенциала) может привести к бифуркации — переходу решения уравнения (54) на траекторию, аттрактором которой является значение концентрации n_2 . При этом, поскольку концентрация является функцией F_Λ , химический потенциал после малой флуктуации будет возрастать до тех пор, пока не выполнится второе из соотношений (55).

Дополнительно значение n_2 ограничено требованием сохранения энергии плазмы. Флуктуация происходит при начальной плотности энергии, равной нулю, и должна приводить к переходу Φ -плазмы в вырожденное состояние также с нулевой энергией, откуда получим

$$n_2(t_F) = n(t_F) = (3/2)n^{(\Lambda)}(\Theta(t_F)) > n^{(\Lambda)}(\Theta(t_F)). \quad (56)$$

Таким образом, большая флуктуация плотности квазичастиц Φ -плазмы возможна. Она развивается из малой флуктуации плотности как результат неустойчивости решения уравнения для полного количества квазичастиц Φ -плазмы в окрестности нулевого значения. Причиной неустойчивости является положительная скорость расширения Вселенной. В результате с сохранением плотности энергии происходит переход Φ -плазмы из неустойчивого невырожденного состояния в устойчивое вырожденное состояние, а затем переход вырожденной электронейтральной Φ -плазмы в вакуумоподобное состояние — динамическую темную энергию.

5. Параметр Хаббла в прошлом

Описанный сценарий образования темной энергии и полученные формулы позволяют рассчитать параметр Хаббла H и соответствующее ему красное смещение

$$z(t_0, t) = a(t_0)/a(t) - 1 \quad (57)$$

по отношению к настоящему моменту t_0 как функцию времени $t \leq t_0$. Будем далее называть представленную здесь модель динамической темной энергии ДТЭ-моделью, а относящиеся к ней величины помечать индексом *DDE* (*Dynamic Dark Energy*).

На рис. 9 и 10 представлены результаты расчетов для плоской Вселенной при предположениях, что $n(t_F) = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ и $H_0 = 74,1 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$. Там же показаны результаты аналогичных расчетов для Λ CDM-модели (величины помечены индексом Λ CDM) при $\Omega^{(m)}(t_0) = 0,168$ и $H_0 = 67,9 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$.

В ДТЭ-модели флуктуация приводит к относительно кратковременному всплеску параметра Хаббла до гигантских значений порядка $10^8 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$. Наибольшие значения H^{DDE} сосредоточены на коротком временном промежутке около 13 лет. Возвращение H^{DDE} к привычным значениям порядка сотен $\text{км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ происходит примерно через 240 млн. лет. В связи с тем, что в рассматриваемой модели темная энергия при $t < t_\Lambda$ отсутствует, а плотность энергии Φ -плазмы при $t < t_F$ близка к нулю, значения H^{DDE} непосредственно перед флуктуацией составляет около $74,2 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$, т. е. примерно такое же значение, как и в настоящее время. При выбранных H_0 существует область длительностью примерно 630 млн. лет, в которой параметр Хаббла Λ CDM-модели превышает его значения для ДТЭ-модели.

Красное смещение $z^{DDE}(t_0, t)$ представляет собой гладкую функцию времени с резким изгибом вблизи точки $t = t_F$ (см. рис. 10). При всех $t < t_0$ оно превышает $z^{\Lambda\text{CDM}}(t_0, t)$. Однако проведенные расчеты показали, что последнее свойство не универсально. Взаимное расположение кривых $z^{DDE}(t_0, t)$ и $z^{\Lambda\text{CDM}}(t_0, t)$ изменяться в зависимости от выбора H_0 .

Значение красного смещения z_{tr} , при котором происходит переход к ускоренному расширению Вселенной, для ДТЭ-модели составляет 0,988, а для Λ -модели — 0,863. Причем это событие в разных моделях отделяют от нашего времени промежутки в 4,80 млрд. лет и в 7,66 млрд. лет соответственно. Заметим, что если для Λ -модели выбрать $H_0 = 74,1 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$, то z_{tr} составит 0,752, а время — 6,39 млрд. лет назад. Только это

значение укладывается в интервал $z_{tr} = 0,65 \pm 0,16$, предлагаемый в работе [34] на основе статистического анализа данных астрономических измерений.

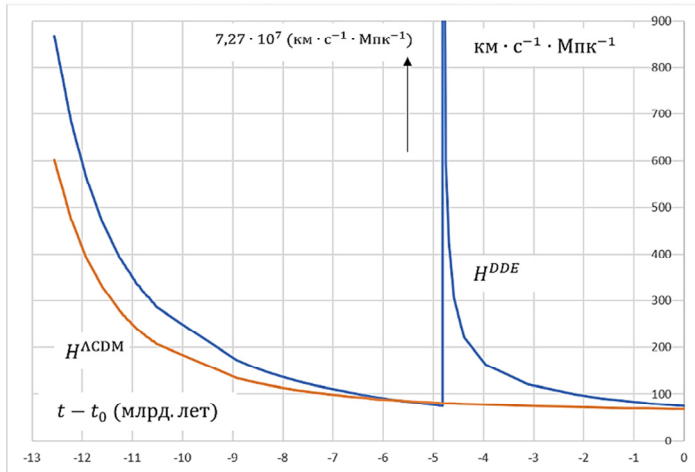


Рис. 9. Зависимость от времени параметра Хаббла в ДТЭ-модели и в Λ CDM-модели для плоской Вселенной при $t \leq t_0$.

Fig. 9. Dependence of Hubble parameter from the time in framework of DDE- model and of Λ CDM-model for the flat Universe when $t \leq t_0$

Постоянная Хаббла не может быть измерена непосредственно [1, 3]. Для ее вычисления используют различные гипотезы [35]. При анализе данных астрономических измерений параметров цефеид и вспышек сверхновых типа *Ia* предполагается справедливость закона Хаббла

$$cz = H_0 r. \quad (58)$$

При обработке данных измерений флуктуаций реликтового излучения или акустических барионных колебаний предполагаются известными радиус звукового горизонта рекомбинации r_s или звукового горизонта в эпоху торможения r_d и связи с этими расстояниями соответствующего красного смещения z_{rec} или времени t_d . Эти связи существенно зависят от используемой модели эволюции Вселенной, но всегда при известных z постоянная Хаббла убывает с ростом расстояний r , r_s или r_d .

В формуле (58) непосредственно измеряемой величиной является красное смещение. Предположим, что измерения дают для него значения $z = z^{DDE}$ и при этом предполагается, что справедлива Λ CDM-модель. Тогда, как показано на рис. 11, измеряемым величинам z будут соответствовать временные промежутки

$$(t - t_0)^{sh} = t - t_0 - \Delta t^{sh}. \quad (59)$$

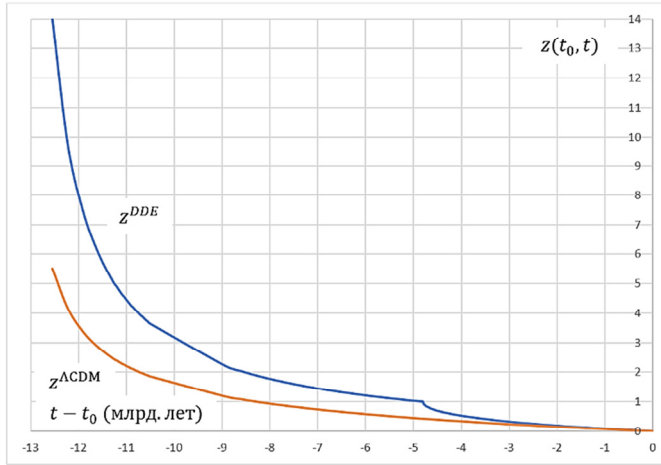


Рис. 10. Зависимость от времени красного смещения в ДТЭ- модели и в Λ CDM-модели для плоской Вселенной при $t \leq t_0$.

Fig. 10. Dependence of red shift from the time in framework of DDE-model and of Λ CDM-model for flat Universe when $t \leq t_0$

Полагая

$$r^{sh} = -c(t - t_0)^{sh}, \quad (60)$$

определим параметр

$$H^{sh}(t_0, t) = -z^{DDE}(t_0, t)/(t - t_0)^{sh}. \quad (61)$$

Значение H^{sh} в точке $t = t_0$, в которой числитель и знаменатель выражения (61) равны нулю, вычислим, требуя непрерывность функции $H^{sh}(t_0, t)$ при всех t .

Графики $H^{sh}(t_0, t)$ и $H^{\Lambda\text{CDM}}$ представлены на рис. 12. Величина $H^{sh}(t_0, t_0)$ оказывается равной $68,1 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$, то есть отличается от принятой в расчетах для Λ CDM-модели $H_0 = 67,9 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ менее чем на 0,3 %. Таким образом, используя предполагаемые достоверными значения красного смещения ДТЭ-модели, и определяя соответствующие этим красным смещениям расстояния до источников излучения на основе Λ CDM-модели, мы получили для H_0 ту же величину, что и в Λ CDM-модели. Отсюда можно сделать вывод, что «напряжение Хаббла» может быть объяснено неверными значениями радиусов r_s и r_d , вычисленных на основе Λ CDM-модели или ее различных модификаций.

Гигантский скачок параметра H^{DDE} , показанный на рис. 9, вряд ли будет измерен. Следуя алгоритму непосредственного измерения красного

смещения и последующего применения закона Хаббла с оценкой расстояния до источника излучения разными непрямыми методами, логично ввести «наблюдаемый» параметр Хаббла

$$H^{obs}(t_0, t) = z(t_0, t)/(t_0 - t). \quad (62)$$

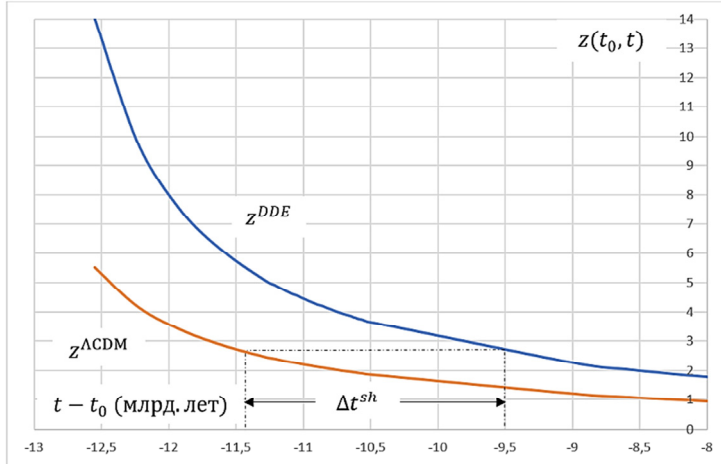


Рис. 11. Иллюстрация процедуры вычисления временного сдвига Δt^{sh} .

Fig. 11. Illustration of procedure of the time shift Δt^{sh} calculation

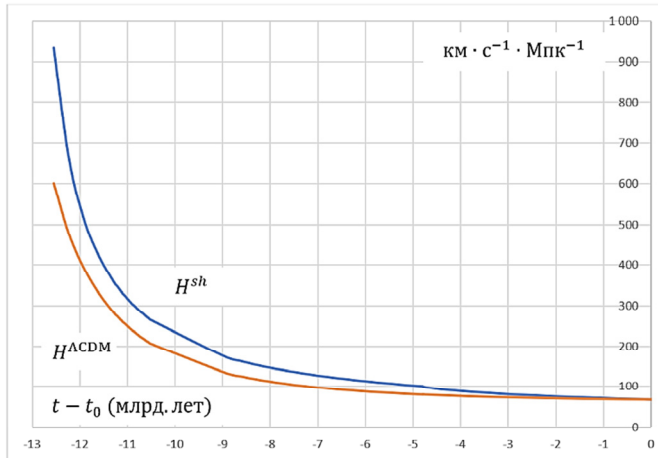


Рис. 12. Зависимость от времени параметров $H^{sh}(t_0, t)$ и $H^{\Lambda CDM}$ при $t \leq t_0$.

Fig. 12. Dependence of parameters $H^{sh}(t_0, t)$ and $H^{\Lambda CDM}$ from the time when $t \leq t_0$

График этой величины для ДТЭ-модели представлен на рис. 13. В отличие от графика H^{DDE} он не содержит гигантского пика в области $t_F < t \leq t_\Lambda$ и

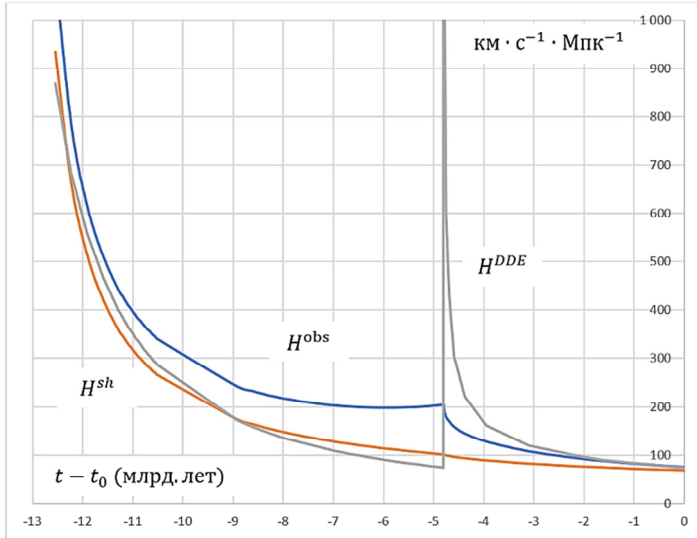


Рис. 13. Зависимость от времени параметров H^{sh} , H^{obs} и H^{DDE} при $t \leq t_0$.

Fig. 13. Dependence of the parameters H^{sh} , H^{obs} and H^{DDE} from the time when $t \leq t_0$

области значений, меньших $H^{\Lambda CDM}$, непосредственно перед моментом флуктуации. Перед флуктуацией величина H^{obs} порядка $200 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ и плавно увеличивается на несколько процентов, а затем относительно быстро уменьшается. Также на 0,37% изменилась постоянная Хаббла: $H_0^{obs} = H^{obs}(t_0, t_0) = 74,3 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$.

На рис. 14 представлены кривые зависимости параметров H^{obs} и H^{sh} от красного смещения в области значений $0 \leq z \leq 2$: соответствующие данные астрономических измерений параметра Хаббла, взятые из статей [19, 34] (обозначены ромбами) и эти же данные, пересчитанные с учетом ошибки определения расстояния в ΛCDM -модели (обозначены треугольниками). Видно, что вплоть до значений z_{tr} данные измерений (ромбы), интерпретированные в рамках ΛCDM -модели, хорошо согласуются с кривой H^{sh} . При больших z наблюдается существенное несоответствие измерений и теоретической кривой. Экспериментальные значения отклоняются от H^{sh} в сторону больших величин. Пересчет данных измерений параметра Хаббла в предположении достоверности величин красного смещения, но ошибочности определения расстояний, дает распределение экспериментальных данных (треугольники), хорошо согласующееся с ДТЭ-моделью (кривая H^{obs}).

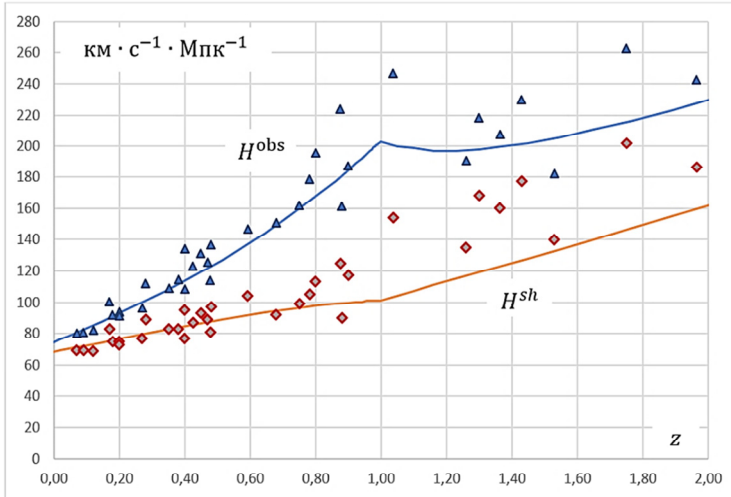


Рис. 14. Зависимость параметров H^{obs} и H^{sh} от красного смещения z , данные астрономических измерений (ромбы) и пересчитанные данные астрономических измерений (треугольники).

Fig. 14. Dependence of parameters H^{obs} and H^{sh} from the red shift z , astronomical measurement data (diamonds) and recalculated astronomical measurement data (triangles)

6. Заключение

В настоящей статье описана модель (ДТЭ-модель), в которой темная энергия является динамической субстанцией, образовавшейся в момент времени

$$t_{\Lambda} \approx 2/3H_0 \approx 9,6 \text{ млрд. лет}$$

после Большого Взрыва в результате большой флуктуации плотности $\rho_0^{(\Lambda)} \sim 10^{-17} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ плазмы спинорных квазичастиц, антиквазичастиц и случайного электромагнитного поля.

Флуктуация произошла в момент времени $t_F < t_{\Lambda}$ и вывела плазму из состояния термодинамического равновесия. В процессе релаксации к равновесию через промежуток времени после флуктуации $\Delta t_{\Lambda F} \approx 8,4$ часа плотность энthalпии плазмы стала нулевой, плазма стала вакуумоподобной и превратилась в динамическую темную энергию.

Плотность темной энергии уменьшается с ростом времени по закону

$$\rho^{(\Lambda)}(t) = \rho_0^{(\Lambda)} / [1 + (\rho_0^{(\Lambda)} / \rho_{\infty}^{(\Lambda)}) (3H_0(t - t_{\Lambda}))],$$

где

$$\rho_{\infty}^{(\Lambda)} = (H_0/\pi e^4)(3mc)^3 \approx 7,94 \cdot 10^{-30} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}.$$

Численные оценки даны для $H_0 = 2,4 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1} = 74,1 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$.

Представлены расчеты параметра Хаббла H и связанных с ним величин в прошлом и будущем. В рассматриваемой модели H монотонно убывает с ростом времени при $0 < t < t_F$ и $t > t_{\Lambda}$. В момент флуктуации t_F параметр Хаббла кратковременно возрастает до гигантских значений порядка $10^8 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$. Наибольшие значения H сосредоточены на коротком временном промежутке около 13 лет. Релаксация к значениям порядка сотен $\text{км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ происходит примерно за 240 млн. лет после t_{Λ} . В ДТЭ-модели ускорение расширения Вселенной в настоящее время уменьшается и будет уменьшаться еще приблизительно 41,8 млрд. лет, а затем начнет возрастать.

В рамках ДТЭ-модели можно также объяснить причину так называемого «напряжения Хаббла»: различий в значениях постоянной Хаббла, получаемых в результате анализа данных о «ранней» и «поздней» Вселенной. Наличие в прошлом области гигантских значений параметра Хаббла существенно изменяет зависимость от времени красного смещения и сопоставляемого этому красному смещению расстояния. Это обстоятельство не учитывается в других космологических моделях, что приводит к ошибочному определению расстояний до источников, излучивших электромагнитные волны 3 млрд. лет назад и более ($z > 0,25$).

Список литературы

1. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Строение и эволюция вселенной. М. : Наука, 1975. 736 с.
2. Чернин А. Д. Темная энергия и всемирное антитяготение // УФН. 2008. Т. 178, № 3. С. 267—300.
3. Горбунов Д. С., Рубаков В. А. Введение в теорию ранней Вселенной. Теория горячего Большого взрыва. М. : ЛЕНАНД, 2016. 616 с.
4. Игнатьев Ю. Г. Классическая космология и темная энергия. Казань : Изд-во Казан. ун-та, 2016. 248 с.
5. Riess A. G., Filippenko A. V., Challis P. et al. Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant // Astron. J. 1998. Vol. 116, no. 3. P. 1009–1038.
6. Perlmutter S., Aldering G., Goldhaber G. et al. Measurements of Omega and Lambda from 42 high redshift supernovae // Astrophys. J. 1999. Vol. 517, no. 2. P. 565–586.
7. Hinshaw G., Larson D., Komatsu E. et al. Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations : Cosmological Parameter Results // arXiv:1212.5226v3 [astro-ph.CO]. 2013. P. 1–32.
8. Aghanim N., Akrami Y., Ashdown M. et. al. Planck 2018 results VI. Cosmological parameters // Astronomy & Astrophysics. 2020. Vol. 641, no. A6. P. 1–67.
9. Guo W., Wang Q., Cao S. et. al. Newest measurements of Hubble constant from DESI 2024 BAO observations // arXiv:2412.13045v1 [astro-ph.CO]. 17 Dec 2024. P. 1–7.

10. DES Collaboration : Abbott T. M. C., Acevedo M., Aguena M. et. al The Dark Energy Survey : Cosmology Results with ~ 1500 New High-redshift Type Ia Supernovae Using the Full 5 yr Data Set // *The Astrophysical Journal Letters*. 2024. Vol. 973. No. L14. P. 1–20.
11. DESI Collaboration : Adame A. G. et. al // DESI 2024 IV : Baryon Acoustic Oscillations from the Lyman alpha forest // *JCAP*. 2025. Vol. 01, no. 124. P. 1–63.
12. DESI Collaboration : Karim M. Abdul, Aguilar J., Ahlen S. et. Al. DESI DR2 Results II : Measurements of Baryon Acoustic Oscillations and Cosmological Constraints // *arXiv:2503.14738v2 [astro-ph.CO]*. 26 Mar 2025. P. 1–40.
13. Зельдович Я. Б. // Космологическая постоянная и теория элементарных частиц. УФН. 1968. Т. 95, вып. 1. С. 209—230.
14. Зельдович Я. Б. Теория вакуума, быть может, решает загадку космологии // УФН. 1981. Т. 133, вып. 3. С. 479—503.
15. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. М. : Наука, 1973. 504 с.
16. Marttens R. von, Alcaniz J. Dark energy and cosmic acceleration // *arXiv:2502.00923v1 [astro-ph.CO]*. 2 Feb 2025. P. 1–19.
17. Глинер Э. Б. Алгебраические свойства тензора энергии-импульса и вакуумоподобное состояние вещества // ЖЭТФ. 1965. Т. 49, № 2. С. 542—548.
18. Efstathiou G. Evolving dark energy or supernovae systematics? // *MNRAS*. 2025. Vol. 538. P. 875–882.
19. Luongo O., Muccino M. Dark energy reconstructions combining baryonic acoustic oscillation data with galaxy clusters and intermediate-redshift catalogs // *Astronomy & Astrophysics*. 2025. Vol. 693, A187. P. 1–10.
20. Lodha K., Calderon R., Matthewson W. L. et. Al. Extended Dark Energy analysis using DESI DR2 BAO measurements // *arXiv:2503.14743v2 [astro-ph.CO]*. 3 Apr 2025. P. 1–27.
21. Scomparin M. Circumventing the Ricci-inverse no-go theorem with complexifiable singularities: a novel dark energy model // *arXiv:2409.16529v1 [gr-qc]*. 25 Sep 2024. P. 1–9.
22. Carloni Y., Luongo O. Phase-space analysis of dark energy models in non-minimally coupled theories of gravity // *Class. Quantum Grav.* 2025. Vol. 42, no. 7. Art. 075014.
23. Elbers W., Frenk C. S., Jenkins A., Li B., Pascoli S. Negative neutrino masses as a mirage of dark energy // *Phys. Rev. D*. 2025. Vol. 111. P. 063534-1–063534-8.
24. Obukhov I. A. Cosmological Constant and Energy Density of Random Electromagnetic Field // *Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology*. 2016. Vol. 2. P. 312–319.
25. Obukhov I. A. Density of Vacuum-Like Plasma and Hubble Constant // *Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology*. 2017. Vol. 3. P. 572–587.
26. Обухов И. А. Стохастическая электродинамика спинорных полей. [Б. м.] : Издательские решения, 2020. 168 с.
27. Умэдзава Х., Мацумото Х., Татики М. Термополевая динамика и конденсированные состояния. М. : Мир, 1985. 504 с.
28. Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В. Введение в теорию квантованных полей. М. : Наука, 1976. 480 с.
29. Гроот де С., Леувен ван В., Верт ван Х. Релятивистская кинетическая теория. М. : Мир, 1983. 424 с.
30. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. Часть 1. М. : Наука, 1976. 584 с.
31. Larionov M. G. Physical Properties of the Matter Associated with the Concept “Dark Energy” // *Infocommunications and Radio Technologies*. 2024. Vol. 7, no. 1. P. 1–32.
32. Tora X. D., Hu J. P., Wang F. Y. Evidence of a decreasing trend for the Hubble constant // *arXiv:2212.00238v3 [astro-ph.CO]*. 14 Apr 2023. P. 1–10.
33. Берестецкий В. Б., Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Квантовая электродинамика. Теоретическая физика в 10 томах. М. : Наука, 1980. Т. IV. 704 с.

34. Hu J. P., Jia X. D., Gao D. H. et al. Constraints on transition redshift utilizing the latest $H(z)$ measurements and comments on the Hubble tension // MNRAS. 2025. Vol. 542. P. 1063–1075.
35. Perivolaropoulos L. Hubble Tension or Distance Ladder Crisis? // arXiv:2408.11031v4 [astro-ph.CO]. 2 Sep 2024. P. 1–44.

Информация об авторе

Обухов Илья Андреевич, доктор физико-математических наук, технический директор АО НПП «Радиотехника», г. Москва, Российская Федерация; профессор филиала РТУ МИРЭА в г. Фрязино, г. Фрязино, Российская Федерация.

Dynamical Dark Energy and “Hubble Tension”

^{1,2} I. A. Obukhov

¹Scientific-Industrial Company “Radiotechnika”, Moscow, Russian Federation

²Filial RTU MIREA v g. Friazino, Friazino, Russian Federation

ia@npprt.ru

Received: January 6, 2026

After refining: February 25, 2026

Peer-reviewed: March 2, 2026

Accepted: March 2, 2026

Abstract: A model in which dynamic dark energy was formed at some point in time as a result of a large fluctuation of the concentration in an electroneutral plasma of spinor quasiparticles and anti-quasiparticles interacting with a random electromagnetic field is proposed. The evolution of the density of dark energy and related quantities such as the Hubble parameter and the acceleration of the expansion of the Universe are considered. It is shown that the model makes to explain the so-called “Hubble tension”, as well as the slowing acceleration of the expansion of the Universe at the present time.

Keywords: quasiparticles, anti-quasiparticles, random electromagnetic field, vacuum-like plasma, electroneutrality, fluctuation, enthalpy, Hubble constant, “Hubble tension”.

For citation (IEEE): I. A. Obukhov, “Dynamical Dark Energy and ‘Hubble tension’,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 3, pp. 367–396, 2026, doi: 10.21227/9f02-6s71. (In Russ.).

References

- [1] Ya. B. Zel’dovich and I. D. Novikov, *The Structure and Evolution of the Universe*, Moscow: Nauka, 1975. (In Russ.).
- [2] A. D. Chernin, “Dark Energy and Universal Antigravitation,” *Physics-Uspekhi*, vol. 51, pp. 253–282, 2008.
- [3] D. S. Gorbunov and V. A. Rubakov, *Introduction to Early Universe Theory. Hot Big Bang Theory*. Moscow: LENAND, 2016. (In Russ.).
- [4] Yu. G. Ignat’ev, *Classical Cosmology and Dark Energy*, Kazan: Kazan University, 2016. (In Russ.).
- [5] A. G. Riess, A. V. Filippenko, P. Challis, et al., “Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant,” *Astron. J.*, vol. 116, no. 3, pp. 1009–1038.
- [6] S. Perlmutter, G. Aldering, G. Goldhaber, et al., “Measurements of Omega and Lambda from 42 high redshift supernovae,” *Astrophys. J.*, vol. 517, no. 2, pp. 565–586, 1999.
- [7] G. Hinshaw, D. Larson, E. Komatsu, et al., “Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Parameter Results”, arXiv:1212.5226v3 [astro-ph.CO], pp. 1–32, 2013.
- [8] N. Aghanim, Y. Akrami, M. Ashdown, et al., “Planck 2018 results VI. Cosmological parameters,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 641, no. A6, pp. 1–67, 2020.

- [9] W. Guo, Q. Wang, S. Cao, et al., “Newest measurements of Hubble constant from DESI 2024 BAO observations”, arXiv:2412.13045v1 [astro-ph.CO], pp. 1–7, 2024.
- [10] DES Collaboration: T. M. C. Abbott, M. Acevedo, M. Aguena, et al., “The Dark Energy Survey: Cosmology Results with ~1500 New High-redshift Type Ia Supernovae Using the Full 5 yr Data Set,” *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 973, no. L14, pp. 1–20, 2024.
- [11] DESI Collaboration: A. G. Adame, et al., “DESI 2024 IV: Baryon Acoustic Oscillations from the Lyman alpha forest,” *JCAP*, vol. 01, no. 124, pp. 1–63, 2025.
- [12] DESI Collaboration: M. A. Karim, J. Aguilar, S. Ahlen, et al., “DESI DR2 Results II: Measurements of Baryon Acoustic Oscillations and Cosmological Constraints,” arXiv:2503.14738v2 [astro-ph.CO], pp. 1–40, 2025.
- [13] Ya. B. Zel’dovich, “The cosmological constant and the theory of elementary particles,” *Sov. Phys. Usp.*, vol. 11, pp. 381–393, 1968.
- [14] Ya. B. Zel’dovich, “Vacuum theory: a possible solution to the singularity problem of cosmology,” *Sov. Phys. Usp.*, vol. 24, pp. 216–230, 1981.
- [15] L. D. Landau and E. M. Lifshits, *Theory of Field*, Moscow: Nauka, 1973. (In Russ.).
- [16] R. Martens and J. von, Alcaniz, “Dark energy and cosmic acceleration,” arXiv:2502.00923v1 [astro-ph.CO], pp. 1–19, 2025.
- [17] E. B. Gliner, “Algebraic Properties of the Energy-Momentum Tensor and Vacuum-Like States of Matter,” *Sov. Phys. JETP*, vol. 22, no 2, p. 378–382, 1966.
- [18] G. Efstathiou, “Evolving dark energy or supernovae systematics?,” *MNRAS*, vol. 538, pp. 875–882, 2025.
- [19] O. Luongo and M. Muccino, “Dark energy reconstructions combining baryonic acoustic oscillation data with galaxy clusters and intermediate-redshift catalogs,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 693, no. A187, pp. 1–10, 2025.
- [20] K. Lodha, R. Calderon, W.L. Matthewson, et al., “Extended Dark Energy analysis using DESI DR2 BAO measurements,” arXiv:2503.14743v2 [astro-ph.CO], pp. 1–27, 2025.
- [21] M. Scomparin, “Circumventing the Ricci-inverse no-go theorem with complexifiable singularities: a novel dark energy model”, arXiv:2409.16529v1 [gr-qc], pp. 1–9, 2024.
- [22] Y. Carloni and O. Luongo, “Phase-space analysis of dark energy models in non-minimally coupled theories of gravity,” *Class. Quantum Grav.*, vol. 42, art. 075014, 2025.
- [23] W. Elbers, C. S. Frenk, A. Jenkins, B. Li, and S. Pascoli, “Negative neutrino masses as a mirage of dark energy,” *Phys. Rev. D*, vol. 111, pp. 063534-1–063534-8, 2025.
- [24] I. A. Obukhov, “Cosmological Constant and Energy Density of Random Electromagnetic Field”, *Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology*, vol. 2, pp. 312–319, 2016.
- [25] I. A. Obukhov, “Density of Vacuum-Like Plasma and Hubble Constant,” *Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology*, vol. 3, pp. 572–587, 2017.
- [26] I. A. Obukhov, *Stochastic Electrodynamics of Spinor Fields*, Izdatelskiye reshenia, 2020. (In Russ.).
- [27] H. Umezava, H. Matsumoto, and M. Tachiki, *Thermo Field Dynamics and Condensed States*, Amsterdam – New York – Oxford: North-Holland Publishing Company, 1982.
- [28] N. N. Bogolubov and D. V. Shirkov, *Introduction to Theory of quantum fields*, Moscow: Nauka, 1976. (In Russ.).
- [29] S. R. de Groot., W. A. van Leeuwen, and Ch. G. van Weert, *Relativistic Kinetic Theory. Principles and Applications*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam - New York – Oxford, 1980.
- [30] L. D. Landau and E. M. Lifshits, *Statistical Physics. Part I*, Moscow: Nauka, 1976. (In Russ.).
- [31] M. G. Larionov, “Physical Properties of the Matter Associated with the Concept ‘Dark Energy’”, *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 7, no. 1, pp. 1–32, 2024.

- [32] X. D. Jia, J. P. Hu, and F. Y. Wang, “Evidence of a decreasing trend for the Hubble constant”, arXiv:2212.00238v3 [astro-ph.CO], 14 Apr 2023, pp. 1–10.
- [33] V. B. Berestetskii, E. M. Lifshits, and L. P. Pitaevskii, *Quantum Electrodynamics*, Moscow: Nauka, 1980. (In Russ.).
- [34] J. P. Hu, X. D. Jia, D. H. Gao, et al., “Constraints on transition redshift utilizing the latest $H(z)$ measurements and comments on the Hubble tension,” *MNRAS*, vol. 542, pp. 1063–1075, 2025.
- [35] L. Perivolaropoulos, “Hubble Tension or Distance Ladder Crisis?,” arXiv:2408.11031v4 [astro-ph.CO], 2 Sep 2024. P. 1–44.

Information about the author

Ilya A. Obukhov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Technical Director of JSC NPP Radiotekhnika, Moscow, Russian Federation; professor of Filial RTU MIREA v g. Fрязино, Fрязино, Russian Federation.

Геодезические ограничения сейсмического потенциала Крымского полуострова

Вольвач А. Е., Дмитроца А. И., Неяченко Д. И.

*Отдел радиоастрономии и геодинамики,
Крымская астрофизическая обсерватория РАН
Ялта, 298688, Российская Федерация
volvach@bk.ru*

Получено: 21 марта 2026 г.

Отрецензировано: 26 марта 2026 г.

Принято к публикации: 26 марта 2026 г.

Аннотация: Сейсмический потенциал Крымского полуострова проанализирован на основе современных космических геодезических наблюдений в сочетании с сейсмологическими и геологическими ограничениями. В работе интегрированы данные радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ), глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и спутниковой лазерной дальнометрии (ЛЛС), обработанные в глобальной системе отсчета ITRF2020. Оценены абсолютные и относительные движения Крымского полуострова с целью определения современных скоростей деформации и их влияния на сейсмическую опасность. Абсолютная горизонтальная скорость движения полуострова в глобальной системе отсчета достигает ~ 34 мм/год и отражает общее движение Евразийской литосферной плиты. Однако в системе отсчета, связанной со стабильной частью Евразии, относительные скорости не превышают 3–4 мм/год. Такие малые значения свидетельствуют о низком уровне современной тектонической активности, характерном для внутриплитных областей. Поле деформаций определяется медленным горизонтальным смещением в направлении восток — северо-восток, тогда как вертикальная компонента характеризуется постепенным опусканием поверхности со скоростью порядка 3–4 мм/год. Сравнение с активно деформирующимися регионами Восточного Средиземноморья показывает, что скорости деформации в Крыму существенно ниже, чем в Большом Кавказе, Эгейской области и Вранчской сейсмической зоне. Полученные геодезические ограничения накладывают существенные ограничения на возможное накопление тектонических напряжений в регионе. На основе совместного анализа геодезических скоростей, геологического строения и инструментально-исторической сейсмичности максимальная ожидаемая магнитуда землетрясений оценивается как $M_{\max} \approx 6,8 \pm 0,2$. Землетрясения с магнитудами $M \geq 7,0$ в современных геодинамических условиях представляются маловероятными. Ре-

зультаты показывают, что интеграция современных геодезических наблюдений с сейсмологическим анализом существенно улучшает физическую обоснованность оценок сейсмической опасности и позволяет избежать ее завышения в регионах с низкими скоростями деформации.

Ключевые слова: Крым, сейсмичность, землетрясение, космическая геодезия.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Вольвач А. Е., Дмитроца А. И., Неяченко Д. И. Геодезические ограничения сейсмического потенциала Крымского полуострова // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2026. Т. 9, № 3. С. 397—416.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Вольвач, А. Е. Геодезические ограничения сейсмического потенциала Крымского полуострова / А. Е. Вольвач, А. И. Дмитроца, Д. И. Неяченко // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2026. — Т. 9, № 3. — С. 397—416.

1. Введение

Оценка сейсмической опасности традиционно основывается на статистическом анализе каталогов землетрясений и методах вероятностного сейсмического районирования (*PSHA*) [1, 2]. Несмотря на то, что эти подходы обеспечивают важные количественные оценки повторяемости землетрясений и ожидаемых уровней сейсмического воздействия, в регионах с ограниченными инструментальными наблюдениями или сложным тектоническим строением они могут приводить к значительным неопределенностям [3].

Существенным ограничением чисто статистических подходов является отсутствие прямых ограничений на современные скорости тектонической деформации. Возникновение землетрясений в конечном счете отражает процессы накопления и высвобождения упругой энергии деформации в земной коре [4]. В этой связи современные геодезические измерения, обеспечивающие разрешение движений земной коры на миллиметровом уровне, представляют собой важный источник информации о текущем режиме деформации и могут существенно повысить достоверность оценок сейсмической опасности.

Современные исследования показывают, что геодезические данные являются ключевым элементом физически обоснованных оценок сейсмической опасности, поскольку они непосредственно ограничивают скорость накопления тектонического сейсмического момента и, следовательно, задают верхнюю границу возможного высвобождения сейсмической энергии. Глобальные модели, такие как *GSRM*, демонстрируют, что пространственное распределение деформаций тесно коррелирует с уровнем сейсмической активности и может рассматриваться как независимый индикатор

тор сейсмического потенциала региона. Учет геодезических ограничений в рамках *PSHA* существенно снижает неопределенности в районах с редкой сейсмичностью и предотвращает завышение оценок сейсмического риска в областях с низкими скоростями деформации.

Методы космической геодезии, такие как глобальные навигационные спутниковые системы (*GNSS*), радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ) и спутниковая лазерная дальнометрия (ЛЛС), позволяют с высокой точностью определять скорости движения станций в глобальных земных системах отсчета [5]. Последняя реализация Международной земной системы отсчета — *ITRF2020* — обеспечивает согласованное описание движения станций по всему миру и позволяет надежно оценивать как абсолютные, так и относительные движения литосферных плит [6].

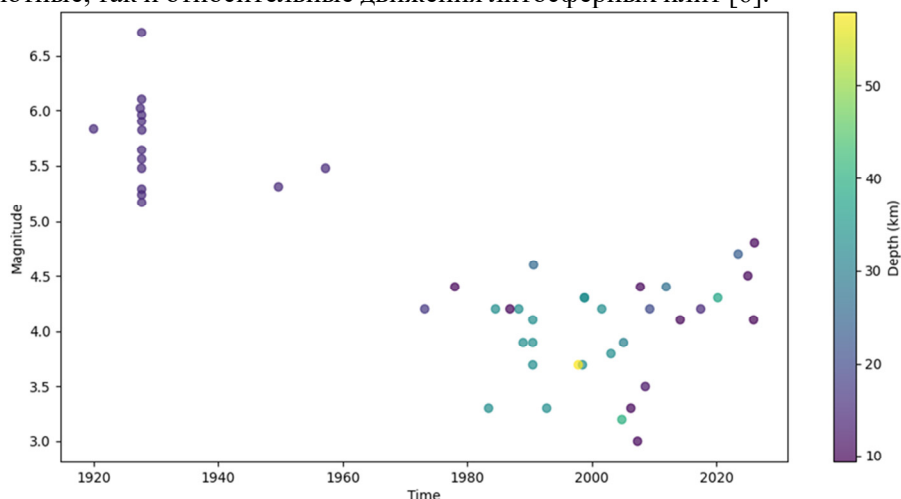


Рис. 1. Землетрясения в Крыму ($M \geq 2,5$).

Fig. 1. Earthquakes in Crimea ($M \geq 2.5$)

Крымский полуостров занимает сложное тектоническое положение в пределах северной окраины Черноморского региона. Несмотря на наличие исторических землетрясений, включая хорошо известную последовательность событий 1927 года, уровень современной тектонической активности остается предметом дискуссии [7, 8]. Согласно ряду оценок сейсмической опасности, возможны относительно высокие максимальные магнитуды, тогда как геологические и геодезические данные указывают на сравнительно низкие скорости деформации (рис. 1) [9].

Целью настоящего исследования является оценка сейсмического потенциала Крымского полуострова на основе современных геодезических

наблюдений. Анализ абсолютных и относительных движений, полученных методами космической геодезии, позволяет определить современный режим деформации и установить физически обоснованные ограничения на максимально возможную магнитуду землетрясений в регионе.

2. Геологическое и тектоническое строение

Крымский полуостров формирует северную границу Черноморского бассейна и представляет собой переходную зону между стабильной Восточно-Европейской платформой и тектонически активными областями Восточного Средиземноморья. Южная часть Крыма занята Крымскими горами, сложенными складчато-нарушенными осадочными толщами, сформированными в ходе альпийского орогенеза (рис. 2).

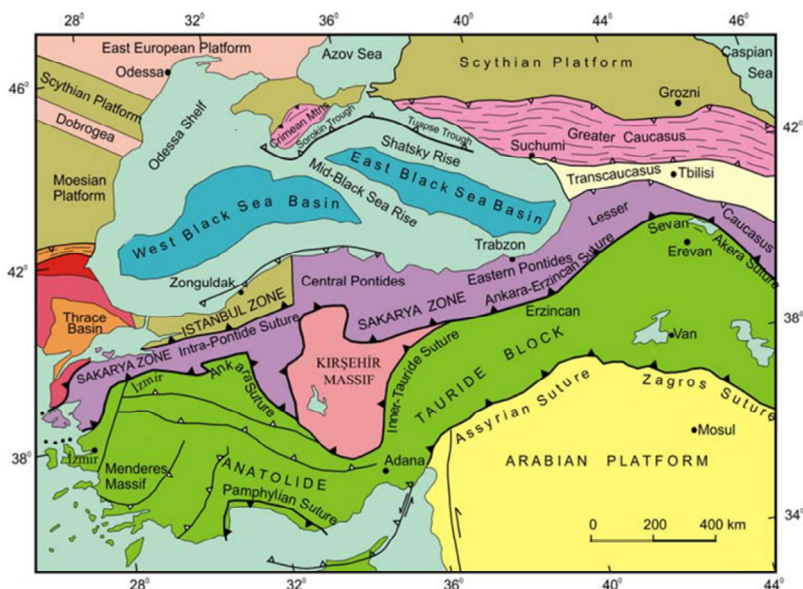


Рис. 2. Тектоническое положение Крымского полуострова в пределах Восточного Средиземноморья (по [10], с изменениями).

Fig. 2. Tectonic position of the Crimean Peninsula within the Eastern Mediterranean (according to [10], with modifications)

Региональная тектоническая обстановка определяется взаимодействием крупных литосферных доменов, включая Евразийскую плиту, Аравийскую плиту и Анатолийский блок [11, 12]. К югу от Крыма Черноморский бассейн подразделяется на западную и восточную субкотловины, разделенные структурными поднятиями, такими как Срединно-Черноморский

вал и поднятие Шацкого. Северная окраина бассейна соответствует Одесскому шельфу и южной границе Восточно-Европейской платформы.

С юга и юго-востока регион ограничен активно деформирующимися структурами Большого Кавказа и Закавказья, где реализуется сжатие, обусловленное сближением Аравийской и Евразийской плит [13]. На юго-западе деформация сосредоточена в пределах Анатолийского домена, характеризующегося вращением блоков и развитием крупных сдвиговых систем, таких как Северо-Анатолийский разлом [14].

С точки зрения современной геодинамики Крымский полуостров расположен в области низких скоростей деформации, что подтверждается глобальными геодезическими моделями, такими как *Global Strain Rate Model (GSRM)* [9], а также современными геодезическими наблюдениями [5]. Эти данные показывают, что: регион находится в пределах зоны рассеянной (диффузной) деформации на южной окраине Восточно-Европейской платформы; второй инвариант тензора скоростей деформации имеет порядок 10^{-9} – 10^{-8} год $^{-1}$; деформация распределена на обширных территориях и не локализована вдоль отдельных крупных активных разломов.

В отличие от этого, в прилегающих областях — в пределах Большого Кавказа, Анатолийского домена и Вранчской сейсмической зоны — наблюдаются существенно более высокие скорости деформации.

Геологическая эволюция региона отражает длительную историю формирования бассейнов в мезозое/кайнозое и коллизионных процессов, связанных с закрытием океана Неотетис. Крымские горы представляют собой северное проявление альпийской складчатости. Сейсмичность региона характеризуется умеренным уровнем и пространственной неоднородностью (рис. 1): основная активность сосредоточена вдоль южного побережья Крыма и в прилегающей акватории Черного моря [7, 8]. Наиболее сильные зарегистрированные события произошли в 1927 г. ($M \approx 6,7$) и, как правило, связаны с реактивацией древних тектонических структур.

Таким образом, тектоническое положение Крымского полуострова определяется его расположением на окраине стабильного кратона. Сочетание низких скоростей деформации и их пространственно распределенного характера создает геодинамическую основу для умеренного уровня сейсмической опасности и позволяет рассматривать регион как внутриплитную область с низкой интенсивностью деформационных процессов.

3. Геодезические данные и их обработка

Современные геодезические наблюдения обеспечивают прямые измерения движений земной коры и, таким образом, являются ключевым ин-

струментом для количественной оценки современных тектонических процессов. В настоящей работе используется совокупность трех методов космической геодезии: радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ), глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и спутниковой лазерной дальнометрии (ЛЛС), которые совместно формируют наблюдательную основу Международной земной системы отсчета [15—19].

Координаты и скорости станций заимствованы из последней реализации системы отсчета — *ITRF2020*, объединяющей многолетние наблюдения, полученные различными геодезическими методами. Использование единой системы отсчета обеспечивает внутреннюю согласованность данных и позволяет надежно оценивать как абсолютное движение литосферных плит, так и относительные внутриплитные деформации.

Обработка геодезических временных рядов выполняется в соответствии с принятыми международными стандартами и включает точное определение орбит спутников, учет поправок на ход часов, моделирование тропосферных и ионосферных задержек, калибровку фазовых центров антенн (для ГНСС), а также оценивание параметров вращения Земли (для РСДБ). Скорости станций определяются по долговременным временным рядам координат с использованием линейной регрессии с удалением сезонных составляющих и учетом нелинейных эффектов, таких как постсейсмические деформации и изменения аппаратуры. Типичная погрешность определения горизонтальных компонент скоростей составляет порядка 0,2—1 мм/год, что позволяет регистрировать крайне малые скорости деформации [15, 17].

Ключевую роль в региональном наборе данных играет геодинамический полигон «Симеиз — Качивели», включающий совмещенные (колокационные) станции РСДБ, ГНСС и ЛЛС (рис. 3) [20]. На его территории расположен 22-метровый радиотелескоп РТ-22 лаборатории радиоастрономии Крымской астрофизической обсерватории, находящийся у подножия горы Кошка на побережье Черного моря, примерно в 20 км к западу от Ялты. Радиоастрономическая станция «Симеиз» была основана в 1965 г. [21]; первые одноантенные наблюдения выполнены в 1966 г., а первые РСДБ-наблюдения — в 1969 г. С 1980 г. станция входит в состав Международной сети РСДБ.

Станции полигона участвуют в международных программах, таких как Международная служба РСДБ для геодезии и астрометрии (*IVS*), Международная служба ЛЛС (*ILRS*) и Международная служба ГНСС (*IGS*), обеспечивая длительные и однородные временные ряды координат. Совмещение различных геодезических методов в пределах одного полигона существенно повышает устойчивость реализации системы отсчета и позволяет выполнять взаимную верификацию оценок скоростей.



Рис. 3. Геодинамический полигон «Симеиз — Кацивели».

Fig. 3. Geodynamic polygon “Simeiz–Katsiveli”

4. Абсолютное и относительное движение

На основе комплексного анализа наблюдений геодинамического полигона «Симеиз — Кацивели» получены оценки как абсолютных, так и относительных скоростей движения Крымского полуострова. Кроме того, проанализированы долговременные вариации северной, восточной и вертикальной компонент координат станций космической геодезии.

Для определения долговременных кинематических характеристик использован обширный массив радиоинтерферометрических (РСДБ) наблюдений, включающий около 6 млн. измерений групповых задержек, накопленных за период 1979—2025 гг. Обработка данных выполнялась с применением стандартных процедур РСДБ-анализа (программного комплекса *CALC/SOLVE*) в соответствии с методикой, изложенной в работах [15, 17]. Для каждого наблюдения вычислялись теоретические значения групповых задержек и соответствующие частные производные по параметрам модели, после чего формировались постфитовые невязки (О–С). Оценивание параметров осуществлялось методом взвешенных наименьших квадратов с учетом индивидуальных погрешностей наблюдений.

РСДБ-анализ включал наблюдения нескольких сотен внегалактических радиоисточников и более 100 станций глобальной сети РСДБ, что обеспечило высокую устойчивость и надежность реализации системы от-

счета. Дополнительно были проанализированы многолетние временные ряды наблюдений ГНСС и спутниковой лазерной дальнометрии, что позволило получить независимые и согласованные оценки современных скоростей движения станций и повысить устойчивость кинематической модели.

В глобальной системе отсчета *ITRF2020* средняя абсолютная горизонтальная скорость станций, расположенных на территории Крымского полуострова, составляет $34,2 \pm 0,6$ мм/год, что отражает квазижесткое движение Евразийской литосферной плиты (рис. 4). Направление движения преимущественно ориентировано на восток — северо-восток, что согласуется с результатами глобальных моделей кинематики плит [18].

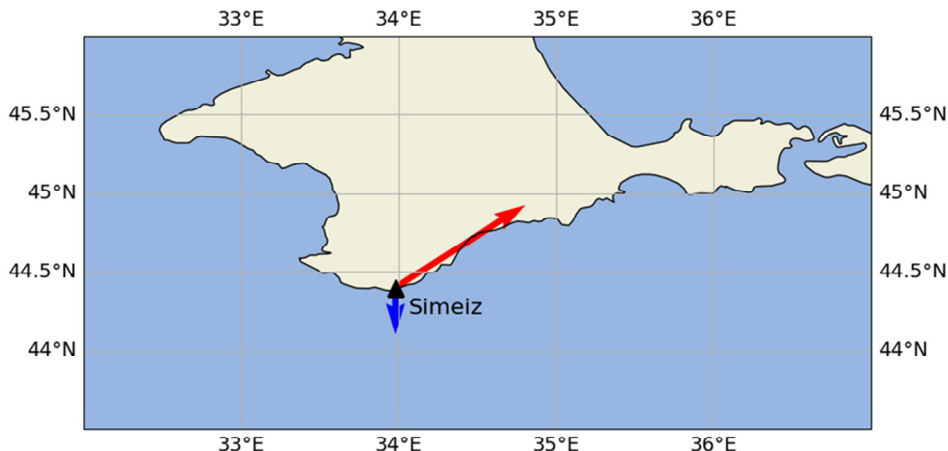


Рис. 4. Направления и скорости движения геодезических станций.

Fig. 4. Directions and speeds of movement of geodetic stations

Следует отметить, что абсолютные скорости не характеризуют внутреннюю тектоническую деформацию региона. Для выделения региональной компоненты движения скорости станций были преобразованы в систему отсчета, связанную со стабильной частью Евразийской плиты, в которой исключено ее квазижесткое движение.

В этой системе отсчета остаточные горизонтальные скорости не превышают $3,5 \pm 0,5$ мм/год, что свидетельствует о: крайне низком уровне внутренней деформации Крымского полуострова, его поведении как кинематически согласованного (квазижесткого) блока, и скоростях накопления деформаций, характерных для внутриплитных областей.

Вертикальная компонента движения показывает локальные зоны опускания в прибрежных районах со скоростями порядка 3–4 мм/год. Следует учитывать, что эти оценки могут включать вклад нетектонических

процессов, таких как уплотнение осадков и локальные геодинамические эффекты, связанные с эволюцией Черноморского бассейна.

В целом согласованность результатов, полученных различными геодезическими методами, и малая величина остаточных скоростей свидетельствуют о том, что современные деформации Крымского полуострова являются слабыми и пространственно распределенными. Эти данные подтверждают его принадлежность к внутриплитной области с низкой интенсивностью деформационных процессов и обеспечивают важные геодезические ограничения для оценки сейсмической опасности региона.

5. Скорости деформации и накопление тектонической энергии

Используя скорости станций, полученные по геодезическим данным, можно количественно оценить современный уровень деформации Крымского полуострова. В первом приближении характерная скорость деформации определяется соотношением: $\dot{\varepsilon} \approx \frac{V}{L}$, где V — относительная скорость между станциями, L — характерный пространственный масштаб геодезической сети.

Согласно решению в системе *ITRF2020* ([15]; см. также раздел 4), абсолютные горизонтальные скорости в регионе достигают ~34 мм/год и отражают квазижесткое движение Евразийской плиты. Однако после перехода в систему отсчета, связанную со стабильной частью Евразии, остаточные скорости не превышают ~3—3,5 мм/год и, таким образом, характеризуют внутреннюю деформацию земной коры.

Принимая характерный масштаб $L \sim 300\text{—}400$ км, второй инвариант тензора скоростей деформации можно оценить как: $\dot{\varepsilon} \approx (0,5\text{—}1,2) \times 10^{-8}$ год⁻¹. Полученная величина хорошо согласуется с глобальными геодезическими моделями, в частности с моделью *Global Strain Rate Model (GSRM)* [9], согласно которой Крымский полуостров расположен в области низких скоростей деформации, представляющей собой зону диффузной тектонической активности на южной окраине Восточно-Европейской платформы. Эти значения на один-два порядка ниже, чем характерные скорости деформации в активных зонах границ плит, таких как Северо-Анатолийский разлом или Эллинская дуга.

Скорость накопления упругой энергии деформации может быть оценена в рамках линейно-упругого приближения. Плотность упругой энергии определяется выражением: $E \approx \frac{1}{2} \mu \cdot \varepsilon^2$, где μ — эффективный модуль сдвига земной коры ($\mu \approx 3 \times 10^{10}$ Па), ε — накопленная деформация. При характерной скорости деформации $\dot{\varepsilon} \approx 10^{-8}$ год⁻¹ время, необходимое

для накопления деформации, типичной для умеренных ковровых землетрясений ($\varepsilon \sim 10^{-5}$), составляет $T \approx \varepsilon / \dot{\varepsilon} \approx 10^3$ лет. Эта оценка задает порядок величины времени накопления упругой энергии, доступной для сейсмического высвобождения, и устанавливает физическую связь между геодезически измеряемыми скоростями деформации и сейсмическим потенциалом региона.

Следует подчеркнуть, что данная оценка носит порядковый характер, поскольку реальный процесс накопления деформации может модифицироваться влиянием транзитных процессов, реологической неоднородности среды и перераспределением напряжений. Тем не менее полученные значения однозначно указывают на медленный характер накопления тектонической энергии в Крымском регионе, что согласуется с низкой частотой сильных землетрясений, умеренными магнитудами исторических событий, отсутствием локализованных зон интенсивной деформации.

Таким образом, геодезические наблюдения предоставляют независимое физическое ограничение, связывающее современные скорости деформации с долговременным сейсмическим потенциалом региона.

6. Ограничения на максимальную магнитуду землетрясений

Максимальная магнитуда землетрясений в регионе в первую очередь определяется количеством упругой энергии деформации, способной накопиться и высвободиться в процессе разрыва разлома. В условиях низких скоростей деформации как скорость накопления энергии, так и размеры сейсмогенных структур накладывают существенные ограничения на сейсмический потенциал региона [22, 23].

Малые остаточные скорости, полученные для Крымского полуострова (раздел 4), соответствуют низкой скорости накопления деформаций ($\sim 10^{-8}$ год⁻¹), что ограничивает как частоту, так и возможную энергию сильных землетрясений. Такая интерпретация согласуется с фундаментальными соотношениями между скоростями тектонической деформации и скоростью высвобождения сейсмического момента, установленными в теории масштабирования землетрясений [24, 25].

Дополнительные ограничения накладываются геологическим строением региона, прежде всего размерами картированных разломных структур. Эмпирические зависимости между магнитудой землетрясения и параметрами разрыва (длиной, площадью и смещением) показывают, что разломы протяженностью в несколько десятков километров, как правило, способны генерировать землетрясения с магнитудами не выше $M \approx 6,8$ —7,0 [26].

Наиболее сильные зарегистрированные исторические события, включая серию Крымских землетрясений 1927 года ($M \approx 6,7$), согласуются с указанными масштабными соотношениями и обеспечивают независимое эмпирическое ограничение сверху.

С учетом геодезических оценок скоростей деформации ($\sim 10^{-8}$ год $^{-1}$), геологических ограничений на размеры разломов, данных инструментальной и исторической сейсмичности, максимально возможная магнитуда землетрясений в Крымском регионе может быть обоснованно оценена как: $M_{\max} \approx 6,8 \pm 0,2$. Данная оценка подтверждается: эмпирическими зависимостями «магнитуда — размер разрыва», механическими ограничениями на размеры сейсмогенных структур, фактическими наблюдениями исторической сейсмичности.

Исходя из уравнения сейсмического момента Кострова и эмпирических зависимостей Уэллса — Копперсмита, для генерации события магнитудой $M > 7,0$ необходима активизация непрерывного разломного сегмента протяженностью более 50—60 км. Однако региональная тектоническая раздробленность и сегментация зон Южнобережного и Крымско-Кавказского разломов ограничивают возможную площадь единовременного разрыва.

Таким образом, расчетное значение $M_{\max} \approx 6,8 \pm 0,2$ является физически детерминированным пределом: текущий бюджет деформаций (3—4 мм/год) при наблюдаемой геометрии разломов недостаточен для реализации более масштабных сейсмических катастроф в краткосрочном и среднесрочном интервалах времени. Это подтверждает необходимость пересмотра детерминистических оценок сейсмической опасности (*DSHA*) в сторону их снижения до уровня, согласующегося с инструментальными геодезическими данными.

Землетрясения с магнитудами, существенно превышающими $M \approx 7,0$, в рамках современного геодинамического режима представляются маловероятными, что обусловлено отсутствием как высоких скоростей накопления деформаций, так и протяженных активных разломов, способных обеспечить развитие крупных разрывов.

7. Обсуждение

Интеграция геодезических и сейсмологических наблюдений обеспечивает физически согласованную основу для оценки сейсмической опасности. В то время как каталоги землетрясений позволяют оценивать статистику повторяемости, геодезические данные непосредственно измеряют скорость накопления тектонических деформаций, которая в итоге определяет высвобождение сейсмической энергии [1, 2].

Для Крымского полуострова геодезические наблюдения в системе отсчета *ITRF2020* показывают, что внутренняя горизонтальная деформация мала ($\leq 3\text{--}3,5$ мм/год), скорости деформации низкие ($\sim 10^{-8}$ год $^{-1}$), деформация пространственно распределена и не локализована вдоль крупных разломов.

Эти результаты согласуются с глобальными моделями скоростей деформаций [9] и подтверждают интерпретацию Крыма как периферийной внутриплитной области, характеризующейся диффузной деформацией.

Сравнение с активно деформирующимися регионами Восточного Средиземноморья подчеркивает принципиально иной геодинамический режим:

Регион	Скорость (мм/год)	Скорость деформации (год $^{-1}$)	Время накопления деформации (лет)
Северо-Анатолийский разлом [11]	20—30	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10\text{--}50$
Большой Кавказ [11, 13, 27]	5—10	$\sim 10^{-7}$	$\sim 100\text{--}500$
Эгейский регион [11, 13, 27]	10—20	$\sim 10^{-7}$	$\sim 100\text{--}300$
Крым (данное исследование)	$\leq 3,5$	$\sim 10^{-8}$	~ 1000

Это сопоставление демонстрирует закономерную связь между скоростью деформации и характерным временем накопления упругих напряжений, согласующуюся с моделями упругого накопления деформации. Контраст показывает, что скорости деформации в Крыму на один-два порядка ниже, чем в основных зонах границ литосферных плит, таких как система Северо-Анатолийского разлома и Эгейская область растяжения [14, 28].

На рис. 5 показано характерное время, необходимое для накопления репрезентативной упругой деформации ($\epsilon \sim 10^{-5}$), соответствующей типичным предразрушительным уровням деформации, связанным с землетрясениями умеренной магнитуды ($M \sim 5\text{--}6$). Оценки получены на основе геодезических скоростей деформации с использованием соотношения: $T \approx \epsilon / \dot{\epsilon}$.

Это сопоставление демонстрирует масштабную зависимость между скоростью деформации и временем накопления напряжений: активные тектонические области накапливают деформацию значительно быстрее, тогда как Крымский полуостров характеризуется существенно более длительными временами накопления, что отражает его внутриплитный низкодеформационный режим.

Оценки основаны на типичных значениях скоростей деформации, полученных по данным ГНСС-наблюдений и глобальных геодинамических моделей. Они наглядно показывают, что для Крыма характерны значительно более длительные интервалы накопления деформации по срав-

нению с активными тектоническими областями. Это отражает низкую скорость тектонического нагружения и предполагает более редкую повторяемость умеренных и сильных землетрясений.

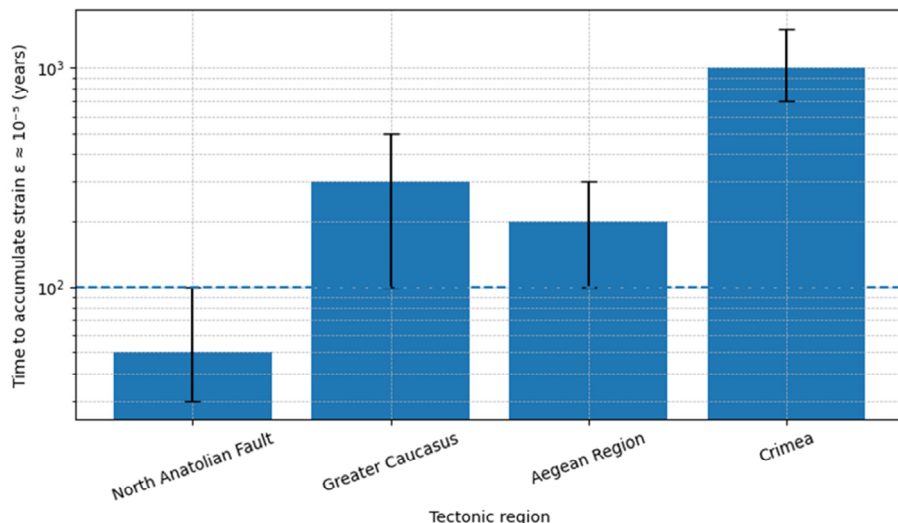


Рис. 5. Сравнение характерных времен накопления деформации (в логарифмическом масштабе) для различных тектонических регионов. Времена оценены по соотношению $T = \epsilon / \dot{\epsilon}$ при предположении характерного уровня деформации $\epsilon \approx 10^{-5}$, соответствующего типичным значениям перед разрушением при умеренных землетрясениях. Полосы погрешностей отражают возможные диапазоны, полученные по данным ГНСС-наблюдений и региональных геодинамических моделей. Пунктирная линия показывает характерный цикл землетрясений ($\sim 10^2$ лет), подчеркивая существенно более длительное время накопления деформации для Крымского полуострова.

Fig. 5. Comparison of characteristic strain accumulation times (on a logarithmic scale) for different tectonic regions. The times are estimated using the ratio $T = \epsilon / \dot{\epsilon}$, assuming a characteristic strain level of $\epsilon \approx 10^{-5}$, corresponding to typical values before failure during moderate earthquakes. Error bars reflect possible ranges obtained from GNSS observations and regional geodynamic models. The dotted line shows the characteristic earthquake cycle ($\sim 10^2$ years), emphasizing the significantly longer strain accumulation time for the Crimean Peninsula

Следует отметить, что приведенные оценки являются оценками первого порядка. Реальные интервалы повторяемости могут варьироваться вследствие: неоднородности разломов, взаимодействия напряжений, транзитных (временных) деформационных процессов. Тем не менее различия на уровне порядков величин между Крымом и областями границ плит остаются устойчивыми.

Согласованность между геодезическими скоростями и моделями скоростей деформации указывает на то, что тектонические напряжения в

регионе: относительно невелики по величине; пространственно распределены, а не локализованы; недостаточны для поддержания частых землетрясений большой магнитуды. Это обеспечивает физическую основу для ограничения ключевых параметров сейсмической опасности, включая максимальную магнитуду и интервалы повторяемости.

В этом контексте традиционный вероятностный подход (*PSHA*), основанный преимущественно на анализе каталогов землетрясений, может приводить к завышению оценки сейсмического потенциала в регионах с низкими скоростями деформации, если не учитывать геодезические ограничения. Включение геодезических данных позволяет вводить физически обоснованные ограничения на сейсмический момент и повышает надежность оценок.

Несмотря на согласованность результатов, следует учитывать ряд ограничений: геодезические наблюдения охватывают относительно короткие интервалы по сравнению с сейсмическими циклами; часть деформации может реализовываться асейсмически; вертикальные движения могут включать нетектонические компоненты (уплотнение осадков, гидрологические эффекты); пространственное разрешение геодезической сети может не выявлять локализованные зоны деформации. Эти факторы вносят неопределенность в оценку долгосрочного сейсмического потенциала, однако не изменяют общего вывода о низкодеформационном характере региона.

В целом совокупность геодезических и сейсмологических данных показывает, что Крымский полуостров характеризуется низкими скоростями и пространственно распределенным режимом деформации, типичным для внутриплитных областей. Такая геодинамическая обстановка фундаментально ограничивает как скорость накопления деформации, так и максимальный размер возможных землетрясений.

Полученные результаты демонстрируют, что включение геодезических ограничений в оценку сейсмической опасности является необходимым условием для получения физически обоснованных и реалистичных оценок сейсмического риска, особенно в регионах с диффузной и слабой деформацией.

8. Выводы

Современные космические геодезические наблюдения обеспечивают надежные и физически обоснованные ограничения на текущий деформационный режим Крымского полуострова. Интеграция данных РСДБ, ГНСС и ЛЛС, обработанных в глобальной системе отсчета *ITRF2020*, показывает, что абсолютное движение региона определяется крупномасштабным дрейфом Евразийской литосферной плиты.

После перехода в систему отсчета, связанную со стабильной частью Евразии, относительные горизонтальные скорости не превышают 3–4 мм/год, что соответствует характерным скоростям деформации порядка $\sim 10^{-8}$ год $^{-1}$. Эти значения указывают на низкий уровень современной тектонической активности, типичный для внутриплитных областей. Поле деформаций характеризуется медленным смещением в направлении восток — северо восток и постепенным опусканием поверхности со скоростью около 3–4 мм/год.

Сравнение с активно деформирующимися регионами Восточного Средиземноморья — Большим Кавказом, Эгейской областью и Вранчской зоной — демонстрирует, что скорости деформации в Крыму на один-два порядка ниже, чем в типичных зонах границ литосферных плит. Это подтверждает, что регион находится в условиях низкой тектонической нагрузки и медленного накопления упругой энергии.

Полученные геодезические ограничения существенно ограничивают возможные темпы накопления напряжений в земной коре и задают физически обоснованную верхнюю границу сейсмического потенциала региона. На основе совместного анализа геодезических скоростей, геологического строения и инструментально исторической сейсмичности максимальная ожидаемая магнитуда землетрясений оценивается как $M_{\max} \approx 6,8 \pm 0,2$, тогда как события с магнитудами $M \geq 7.0$ при современных геодинамических условиях представляются маловероятными.

Интеграция геодезических наблюдений с традиционными сейсмологическими методами обеспечивает независимые и физически обоснованные ограничения при оценке сейсмической опасности. Такой подход существенно снижает неопределенность и предотвращает завышение риска в регионах с низкими скоростями деформации, где исключительно статистические методы могут давать смещенные результаты. Полученные выводы могут быть непосредственно использованы в региональных моделях сейсмической опасности и способствовать более реалистичной оценке риска и разработке эффективных мер его снижения.

Список литературы

1. Cornell C. A. Engineering seismic risk analysis // Bulletin of the Seismological Society of America. 1968. Vol. 58, no. 5. P. 1583–1606.
2. McGuire R. K. Seismic Hazard and Risk Analysis. Oakland, California : Earthquake Engineering Research Institute (EERI). 2004. 240 p.
3. Reiter L. Earthquake Hazard Analysis : Issues and Insights. Columbia University Press, 1990. 254 p.
4. Scholz C. H. The Mechanics of Earthquakes and Faulting. 3rd Edition, Cambridge : Cambridge U. Press, 2019, 493 p.

5. Blewitt G., Hammond W., Kreemer C. Harnessing the GPS Data Explosion for Interdisciplinary Science // *Eos*. 2018. Vol. 99, no. 2. Art. e2020943118.
6. Вольвач А. Е., Дмитроца А. И., Артемов И. В., Неяченко Д. И. Гелио-геодинамический полигон «Симеиз — Кацивели» для задач координатно-временного обеспечения. Труды ИПА РАН. 2016. Вып. 37. С. 55—58.
7. Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е., Горячун А. В. Землетрясения Крымско-Черноморского региона. Киев : Наук. думка, 1989. 192 с.
8. Никонов А. А. Сейсмический потенциал Крымского региона : сравнение региональных карт и параметров выявленных событий // *Физика Земли*. 2000. Том 7. С. 53—62.
9. Kreemer C., Blewitt G., Klein E. C. A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2014. Vol. 15. P. 3849—3889.
10. Sossou M., Stephenson R., Adamia S. Tectonic evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus: an introduction. London : The Geological Society of London, 2017. Vol. 428, no. 1. P. 1—9.
11. Reilinger R., McClusky S., Vernant P. et al. GPS constraints on continental deformation in the Africa–Arabia–Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions // *Journal of Geophysical Research*. 2006. Vol. 111. Art. B05411.
12. Jackson J., McKenzie D. The relationship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East // *Geophysical Journal*. 1988. Vol. 93, no. 1. P. 45—73.
13. Avdeev B., Niemi N., et al. Active tectonics of the Greater Caucasus // *Tectonics*. 2011. Vol. 30. Art. TC5008.
14. Burchfiel B. C., Wang E. Investigations into the tectonics of the Tibetan plateau. Geological Society of America Special Paper. 2008. Vol. 444. 122 p.
15. Petrov L., Volvach A., Nesterov N. Measurements of horizontal motion of the station Simeiz using VLBI // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2001. Vol. 17, no. 5. P. 424—436.
16. Вольвач А. Е., Петров Л. Ю., Нестеров Н. С. Измерение движения станции Симеиз методом РСДБ // *Космическая наука и технология*. 2003. Том 9, № 2. С. 325—330.
17. Вольвач А. Е., Петров Л. Ю. Результаты измерения горизонтальной скорости движения радиоастрономической станции Симеиз // *Известия КрАО*. 2005. Том 101. С. 203—214.
18. Altamimi Z., Rebischung P., Collilieux X. et al. ITRF2020 : an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions // *Journal of Geodesy*. 2023. Vol. 97, no. 5. P. 47.
19. Bevis M., Brown A. Trajectory models and reference frames for crustal motion geodesy // *Journal of Geodesy*. 2014. Vol. 88. P. 283—311.
20. Вольвач А. Е., Курбасова Г. С. Глобальная навигационная спутниковая система в структуре геополитики // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2018. Т. 1, № 2. С. 141—148.
21. Volvach A. E., Volvach L. N., Larionov M. G. Multi-frequency radio monitoring on RT-22 in Simeiz : variability, structure and gravitational-wave prospects of binary supermassive black holes and galactic kilomasers // *Physics-Uspekhi*. 2026. Vol. 69, no. 3. P. 264—289.
22. Scholz C. H. The Mechanics of Earthquakes and Faulting (3rd ed.). Cambridge : Cambridge University Press, 2019. 493 p.
23. Kostrov V. V. Seismic moment and energy of earthquakes, and the seismic flow of rock // *Izv. Acad. Sci. USSR. Phys. Solid Earth*. 1974. Vol. 1. P. 23—44.
24. Aki K. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits // *Bulletin of the Earthquake Research Institute*. 1965. Vol. 43. P. 237—239.

25. Gutenberg B., Richter C. F. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration // Bulletin of the Seismological Society of America. 1956. Vol. 46, no. 2. P. 105–145.
26. Wells D. L., Coppersmith K. J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement // Bulletin of the Seismological Society of America. 1994. Vol. 84, no. 4. P. 974–1002.
27. Vernant P. et al. Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman // Geophysical Journal International. 2004. Vol. 157, no. 1. P. 381–398.
28. Jackson J., McKenzie D. The relationship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East // Geophysical Journal International. 1988. Vol. 93, no. 1. P. 45–73.

Информация об авторах

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

Дмитроца Андрей Иванович, научный сотрудник ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

Неяченко Дмитрий Ильич, научный сотрудник ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

Geodetic Constraints on the Seismic Potential of the Crimean Peninsula

A. E. Volvach, A. I. Dmitrotsa, and D. I. Neyachenko

*Radio Astronomy and Geodynamics Department,
Crimean Astrophysical Observatory, Yalta, 298688, Russian Federation
volvach@bk.ru*

Received: March 21, 2026

Peer-reviewed: March 26, 2026

Accepted: March 26, 2026

Abstract: *The seismic potential of the Crimean Peninsula is analyzed using modern space geodetic observations combined with seismological and geological constraints. The study integrates Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Global Navigation Satellite System (GNSS), and Satellite Laser Ranging (SLR) measurements processed in the global reference frame ITRF2020. Absolute and relative motions of the Crimean Peninsula are evaluated in order to estimate present-day deformation rates and to assess their implications for seismic hazard. The absolute horizontal velocity of the peninsula reaches approximately 34 mm/yr in the global reference frame, reflecting the overall motion of the Eurasian plate. However, in the Eurasia-fixed reference frame the relative motion of the Crimean Peninsula does not exceed 3–4 mm/yr. Such small velocities indicate that the region is characterized by a low level of active tectonic deformation typical of intraplate environments. The deformation field is dominated by slow horizontal displacement directed toward the east–northeast, while the vertical component is characterized by gradual subsidence of approximately 3–4 mm/yr. Comparison with actively deforming regions of the Eastern Mediterranean shows that the strain rates in Crimea are significantly lower than those observed in the Greater Caucasus, the Aegean region, or the Vrancea seismic zone. The obtained geodetic constraints provide important limitations on the potential accumulation of tectonic stresses in the region. Based on the combination of geodetic velocities, geological structure, and instrumental-historical seismicity, the maximum expected earthquake magnitude is estimated as $M_{\max} \approx 6.8 \pm 0.2$. Earthquakes with magnitudes $M \geq 7.0$ appear unlikely under the present geodynamic conditions. The results demonstrate that integration of modern geodetic observations with seismological analysis significantly improves the physical basis of seismic hazard assessments and helps to avoid overestimation of seismic risk in regions with low deformation rates.*

Keywords: *Crimea, seismicity, earthquake, space geodesy.*

For citation (APA): A. E. Volvach, A. I. Dmitrotsa, and D. I. Neyachenko (2026). Geodetic Constraints on the Seismic Potential of the Crimean Peninsula. *Infocommunications and Radio Technologies*, 9(3), 397–416, doi: 10.21227/35ys-cc94.

References

- [1] C. A. Cornell, "Engineering seismic risk analysis," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 58, no. 5, pp. 1583–1606, 1968.
- [2] R. K. McGuire, *Seismic Hazard and Risk Analysis*, Oakland, California: Earthquake Engineering Research Institute (EERI), 2004.
- [3] L. Reiter, *Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insights*, Columbia University Press, 1990.
- [4] C. H. Scholz, *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*, 3rd Edition, Cambridge: Cambridge U. Press, 2019.
- [5] G. Blewitt, W. Hammond, and C. Kreemer, "Harnessing the GPS Data Explosion for Interdisciplinary Science," *Eos*, vol. 99, no. 2, art. e2020943118, 2018.
- [6] A. E. Volvach, A. I. Dmitrotsa, I. V. Artemov, and D. I. Neyachenko, "Helio-geodynamic test site "Simeiz–Katsiveli" for coordinate-time support problems, *Proceedings of the Institute of Applied Earthquakes of the Russian Academy of Sciences*, iss. 37, pp. 55–58, 2016. (In Russ.).
- [7] B. G. Pustovitlenko, V. E. Kulchitsky, and A. V. Goryachun, *Earthquakes of the Crimean – Black Sea region*, Kiev: Naukova Dumka, 1989. (In Russ.).
- [8] A. A. Nikonov, "Seismic potential of the Crimean region: comparison of regional maps and parameters of identified events," *Physics of the Earth*, vol. 7, pp. 53–62, 2000. (In Russ.).
- [9] C. Kreemer, G. Blewitt, and E. C. Klein, "A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model," *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 15, pp. 3849–3889, 2014.
- [10] M. Sosson, R. Stephenson, and S. Adamia, *Tectonic evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus: an introduction*. London: The Geological Society of London, vol. 428, no. 1. P. 1–9. 2017.
- [11] R. Reilinger, et al., "GPS constraints on continental deformation in the Africa–Arabia–Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions," *Journal of Geophysical Research*, vol. 111, art. B05411, 2006.
- [12] J. Jackson, D. McKenzie, "The relationship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East," *Geophysical Journal*, vol. 93, no. 1, pp. 45–73, 1988.
- [13] B. Avdeev, et al., "Active tectonics of the Greater Caucasus," *Tectonics*, vol. 30, art. TC5008, 2011.
- [14] B. C. Burchfiel and E. Wang, *Investigations into the tectonics of the Tibetan plateau*. Geological Society of America Special Paper, vol. 444, 2008.
- [15] L. Petrov, A. Volvach, and N. Nesterov, "Measurements of horizontal motion of the station Simeiz using VLBI," *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, vol. 17, no. 5, pp. 424–436, 2001.
- [16] A. E. Volvach, L. Yu. Petrov, and N. S. Nesterov, "Measurement of the Simeiz Station Motion by the VLBI Method," *Space Science and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 325–330, 2003. (In Russ.).
- [17] A. E. Volvach and L. Yu. Petrov, "Results of Measurements of the Horizontal Velocity of the Simeiz Radio Astronomy Station," *Izvestiya KrAO*, vol. 101, pp. 203–214, 2005.
- [18] Z. Altamimi, et al., "ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions," *Journal of Geodesy*, vol. 97, no. 5. p. 47, 2023.
- [19] M. Bevis and A. Brown, "Trajectory models and reference frames for crustal motion geodesy," *Journal of Geodesy*, 2014, vol. 88, pp. 283–311.
- [20] A. E. Volvach and G. S. Kurbasova, "Global navigation satellite systems in the geopolygon structure," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 1, no. 2, pp. 141–148, 2018. (In Russ.).

- [21] A. E. Volvach, L. N. Volvach, and M. G. Larionov, "Multi-frequency radio monitoring on RT-22 in Simeiz: variability, structure and gravitational-wave prospects of binary supermassive black holes and galactic kilomasers," *Physics-Uspekhi*, vol. 69, no. 3. pp. 264–289, 2026.
- [22] C. H. Scholz, *The Mechanics of Earthquakes and Faulting* (3rd ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 2019.
- [23] V. V. Kostrov, "Seismic moment and energy of earthquakes, and the seismic flow of rock," *Izv. Acad. Sci. USSR. Phys. Solid Earth*, vol. 1, pp. 23–44, 1974.
- [24] K. Aki, "Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits," *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, vol. 43, pp. 237–239, 1965.
- [25] B. Gutenberg and C. F. Richter, "Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 46, no. 2, pp. 105–145, 1956.
- [26] D. L. Wells and K. J. Coppersmith, "New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 84, no. 4, pp. 974–1002, 1994.
- [27] P. Vernant et al., "Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman," *Geophysical Journal International*, vol. 157, no. 1, pp. 381–398, 2004.
- [28] J. Jackson and D. McKenzie, "The relationship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East," *Geophysical Journal International*, vol. 93, no. 1, pp. 45–73, 1988.

Information about the authors

Alexandr E. Volvach, Dr. Sci., FSBSI "Crimean Astrophysical Observatory of RAS", Nauchni, Crimea.

Andrey I. Dmitrotsa, FSBSI "Crimean Astrophysical Observatory of RAS", Nauchni, Crimea.

Dmitry I. Neyachenko, FSBSI "Crimean Astrophysical Observatory of RAS", Nauchni, Crimea.

Некоторые проблемы автономной навигации наземной транспортной платформы

¹Азарнов Н. В., ^{1,2}Кашицын С. Д., ^{3,4}Михайлов П. О., ^{2,4}Обухов И. А.

¹ Научно-производственное предприятие «Исток» им. Шокина

г. Фрязино, Российская Федерация

nvazarnov@istokmw.ru

² Филиал РТУ МИРЭА в г. Фрязино, Российская Федерация

³ МГУ им. М. В. Ломоносова, Физический факультет

Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Москва, 119991, Российская Федерация

⁴ Научно-производственное предприятие «Радиотехника»

ул. акад. Челомея, д. 3, корп. 2, г. Москва, 117630, Российская Федерация

pt@npprt.ru, ia@npprt.ru

Получено: 13 марта 2026 г.

Отрецензировано: 20 марта 2026 г.

Принято к публикации: 20 марта 2026 г.

Аннотация: Представлены результаты экспериментального исследования возможности создания автономного наземного робота, предназначенного для использования вне помещений, на основе доступной компонентной базы. Показано, что такая возможность имеется. Выделены основные проблемы навигации и управления роботом. Определены пути решения проблем.

Ключевые слова: робототехника, наземные мобильные роботы, адаптивные роботы, пространственная ориентация, позиционирование, навигация, управление.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Азарнов Н. В., Кашицын С. Д., Михайлов П. О., Обухов И. А. Некоторые проблемы автономной навигации наземной транспортной платформы // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2026. Т. 9, № 3. С. 417—433.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Азарнов, Н. В. Некоторые проблемы автономной навигации наземной транспортной платформы / Н. В. Азарнов, С. Д. Кашицын, П. О. Михайлов, И. А. Обухов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2026. — Т. 9, № 3. — С. 417—433.

1. Введение

Увлечение роботами стало в последнее десятилетие всеобщим. Инженеры вдохновенно создают все новые и новые образцы, а футурологи

взахлеб предсказывают разнообразные глобальные последствия повальной роботизации.

Роботы и робототехнические комплексы (РТК) различного назначения разрабатываются и производятся уже много веков. История их создания прослеживается вплоть до времён древних Египта, Китая и Вавилона [1]. Во времена расцвета часового мастерства в Европе человекоподобные роботы — андройды создавались в Швейцарии и во Франции. Это были программируемые устройства, способные играть на музыкальных инструментах, писать и рисовать. Среди первых отечественных создателей механических роботизированных систем в XVII—XIX веках можно вспомнить И. П. Кулибина [2], А. И. Галулецкого и И. Мезгина [1, 2]. Однако все конструкции такого рода представляли собой технически сложные и переломные для своего времени игрушки.

Современная робототехника начала развиваться во второй половине XX века в связи с тем, что у промышленности и оборонных ведомств индустриально развитых стран появилась реальная потребность в РТК, а достигнутый уровень развития электроники и электротехники обеспечил техническую основу их создания. Были разработаны и внедрены различные промышленные и военные роботы, беспилотные летательные аппараты, наземные мобильные роботы, подводные и надводные роботы и т. д. Описания и классификации РТК по разным признакам (назначение, конструкции, быстродействие и точность и т. д.) можно найти в большом количестве статей, обзоров и книг (см., например, [1, 4—7] и цитируемую в них литературу).

Принятая в нашей стране классификация роботов и робототехнических устройств представлена в Национальном стандарте Российской Федерации ГОСТ Р 60.0.0.2-2016¹. Рассматриваемые в этой статье роботы относятся к наземным промышленным транспортным мобильным роботам с адаптивным управлением^{1,2}. Одной из важнейших задач обеспечения их эксплуатации является их навигация. В полной мере для автономных роботов она не решена до настоящего времени, [1, 7, 8—13].

Первые наземные мобильные транспортные роботы были созданы для выполнения операций перемещения грузов внутри цехов и на складах. Для их передвижения выделялись отдельные зоны, в которых специальным образом маркировались маршруты.

¹ Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 60.0.0.2-2016. Роботы и робототехнические устройства. Классификация. М.: Стандартинформ, 2016. 11 с.

² Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 60.0.0.04-2019 (ИСО 8373:2012). Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения. (ISO 8373:2012, Robots and robotic devices — Vocabulary, IDT). М.: Стандартинформ, 2019. 25 с.

Позднее, вслед за развитием вычислительной техники и сенсорики, стали появляться мобильные транспортные роботы с адаптивным управлением. Массовое производство микроконтроллеров и микропроцессоров, начавшееся в 80-е годы прошлого века, позволило создавать системы управления роботом, осуществлявшие сложные расчёты на борту. Использование акустических и инфракрасных датчиков, лазерных локаторов (лидаров), портативных видеокамер высокого разрешения, бортовых СВЧ-радаров и других сенсорных устройств, а также технологий искусственных нейронных сетей, обеспечило роботам возможность идентифицировать окружающие объекты с точностью, достаточной для безопасного автономного перемещения в жилых, складских и производственных помещениях^{3,4} [9—10].

Применение автономных наземных роботов вне помещений, на проезжих частях дорог и в пешеходных зонах, до сих пор сталкивается с рядом технических ограничений. Некоторые из них рассмотрены в этой статье.

2. Постановка задачи

Статья написана по материалам проекта, в котором разрабатывался экспериментальный образец системы навигации и управления (СНУ) для наземной транспортной платформы (НТП). Эта система должна обеспечивать автономное передвижение платформы по заданным маршрутам на территории промышленного предприятия большой площади в условиях интенсивного движения других транспортных средств и пешеходов.

Реализовывался следующий сценарий. Предварительно НТП под управлением оператора проходит по возможным маршрутам, и СНУ, используя имеющиеся датчики, сенсоры и вычислительные ресурсы, составляет карту местности. Карта должна включать собственно возможные маршруты передвижения, а также части окружающего их пространства, необходимые для ориентации и позиционирования НТП.

Затем оператор обрабатывает построенную карту: выделяет разрешенные и запрещенные для передвижения зоны. После этого задаются начальная и конечная точки маршрута и средняя скорость перемещения, и НТП автономно перемещается между этими точками, используя разрешенные зоны.

При перемещении обеспечивается постоянная связь НТП с оператором по радиоканалу с возможностью удаленного управления и передача

³ Встречаем ровер третьего поколения: история создания робота-курьера Яндексa. Параметры доступа: <https://habr.com/ru/companies/yandex/articles/590997/>. Дата 16.10.2024.

⁴ Копиев Г. Ваше роботакси подъезжает. С какими вызовами столкнулись разработчики автономного транспорта. Параметры доступа: <https://nplus1.ru/material/2022/10/31/robotaxi-arriving>. Дата 16.10.2024.

оператору видео от НТП. Также соблюдаются требования безопасности и правила дорожного движения.

При возникновении на маршруте препятствий СЧУ НТП самостоятельно принимает решение об их преодолении или непреодолимости. В случае преодолимых препятствий выбирает и реализует маршрут объезда либо включает режим ожидания, если препятствие подвижное (человек, животное, автотранспорт и т. д.). Подвижное препятствие переходит в разряд непреодолимых, если в течении фиксированного промежутка времени оно не исчезает с маршрута. Если препятствие непреодолимое, то СЧУ осуществляет экстренную остановку НТП и остается неподвижным до получения дополнительных команд от оператора.

3. Аппаратное и программное обеспечение

В проекте использовалась радиоуправляемая НТП на гусеничном ходу весом 100 кг и размерами (ширина, длина, высота) 800×1000×600 мм, оснащенная бесколлекторными электродвигателями с контроллерами скорости и направления вращения (*VESC*). Внешний вид платформы показан на рис. 1.



Рис. 1. Наземная транспортная платформа.

Fig. 1. Ground transportation platform (GTP)

Для получения информации о пространственной ориентации и перемещении НТП в СЧУ использовались данные от инерциального измерительного модуля на 10 степеней свободы (*IMU 10 DOF*) и данные от *VESC* правого и левого двигателей. Также «на борту» имелся *GPS/GLONASS* модуль производства компании *Hiwonder*.

Внешняя обстановка контролировалась при помощи стереокамеры *OAK-D Pro*, лидара *RPLIDAR A1M8* и шести ультразвуковых датчиков *URM37 v5.0*. Предварительная обработка данных от ультразвуковых датчиков производилась на программируемом контроллере *STM32H750VBT6*.

Связь и удаленное управление обеспечивались *GSM* модемом *Tandem 4GX-52* (до 100 Мбит/с) с антенной Триада-МА 2697 *SOTA GSM/3G/4G/WiFi*.

Для обработки данных и их хранения использовались микрокомпьютер *Orange Pi 5 Plus* и твердотельный накопитель *SSD M.2*.

Схема физического взаимодействия аппаратных компонентов ЧНУ представлена на рис. 2.

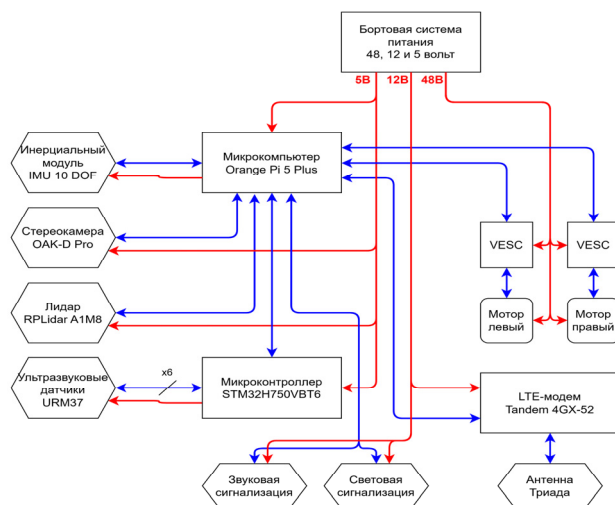


Рис. 2. Схема взаимодействия аппаратных компонентов ЧНУ. Красными линиями указаны линии подачи электропитания, синими линиями указаны пути обмена данными.

Fig. 2. The scheme of navigation and management system hardware components interaction. The red lines indicate the power supply lines, the blue lines indicate the data exchange paths

Общее и специальное программное обеспечение (СПО) ЧНУ строилось на основе свободно распространяемых решений, таких как операционная система *Ubuntu 22.04.5* и пакет прикладных программ *ROS 2 (Robot Operating System 2) Humble*. Система управления базами данных не предусматривалась и не использовалась. Также было разработано СПО на основе искусственных нейронных сетей (модель *YOLO*, обеспечивающее распознавание объектов и управление поведением НТП в различных ситуациях).

Вычислительная и коммутационная инфраструктура размещалась внутри НТП (см. рис. 4). Ультразвуковые датчики располагались попарно сзади и по бокам робота в отверстиях корпуса на высоте 40 см и на расстоянии 60 см друг от друга, спереди ультразвуковые датчики были размещены на высоте 60 см. Стереокамера размещалась на специальной выносной стойке на крыше НТП (см. рис. 5). На крыше также крепились лидар, антенны *GSM* и *GPS/GLONASS*, сирена, красная кнопка экстренной остановки и оранжевый проблесковый маячок, который включается при перемещении робота.

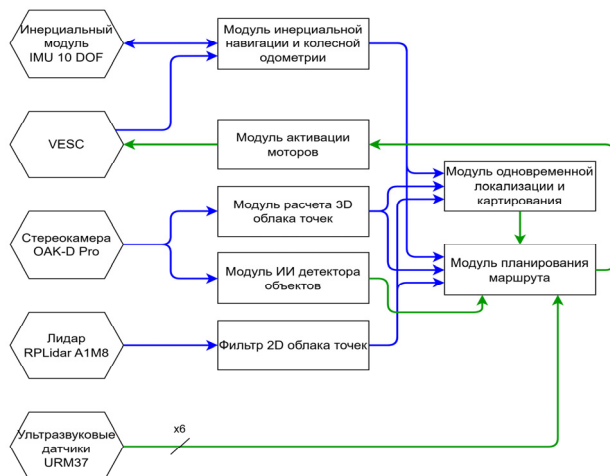


Рис. 3. Схема функционального взаимодействия программных компонентов СНУ. Синими линиями указан путь передачи данных при сборе информации об окружающей среде, зелеными линиями — путь передачи данных от модулей управления НТП.

Fig. 3. The scheme of navigation and management system software components functional interaction. The blue lines indicate the data transmission path when collecting information about the environment, and the green lines indicate the data transmission path from the GTP control modules

Так же в ходе предварительных экспериментов для уточнения пространственного положения НТП использовались инфракрасные маяки, размещенные на территории. Их излучение модулировалось на радиочастоте (1—10 Гц), что позволяло однозначно идентифицировать маяки, установленные в разных точках. Такой метод оказался вполне работоспособным в закрытом помещении. Однако на открытой местности от него пришлось отказаться в связи с высоким уровнем внешней засветки, которая не позволяла уверенно и однозначно распознавать маяки на приемлемом расстоянии. Кроме того, такая инфраструктура требует специального обслуживания и не является всепогодной.

4. Испытания

Испытания разработанной СНУ проводились на соответствие возможности автономного передвижения робота описанному во втором параграфе сценария. При картировании местности использовались облако точек от лидара и изображение от стереокамеры. Учет пространственной ориентации НТП осуществлялся инерциальным модулем, а также модулем обработки колесной одометрии, получаемой от контроллеров моторов *VEESC*.

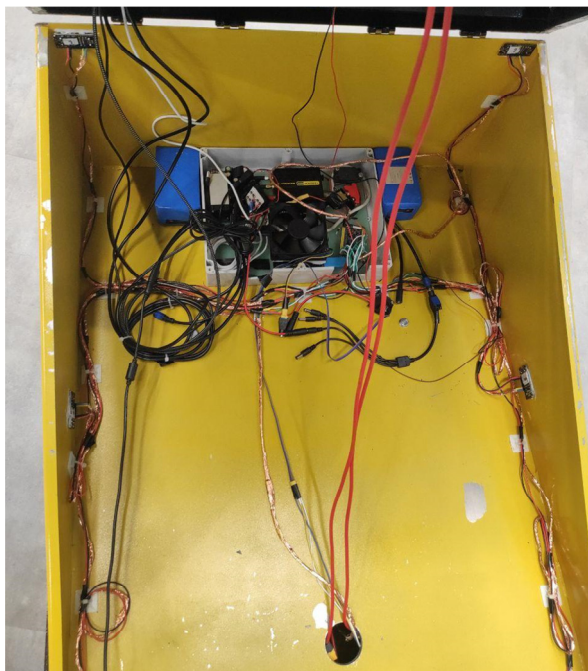


Рис. 4. Размещение аппаратных компонентов внутри НТП.

Fig. 4. Placement of hardware components inside the case of GTP

В условиях пасмурной погоды с мелким снегом в дневное время максимальное расстояние до различимых с качеством достаточным для построения карты объектов составляло примерно пять метров. Это позволяло в течении часа построить карту местности площадью примерно две тысячи квадратных метров.

На карте оператор выделялись маршруты, пригодные для последующего автономного передвижения робота. Отмечались точки начала и окончания движения. Средняя скорость робота на испытаниях задавалась небольшой — до пяти километров в час.



Рис. 5. Размещение аппаратных компонентов на крыше НТП.

Fig. 5. Placement of hardware components on the roof of GTP

Робот продемонстрировал уверенное перемещение по маршруту без дополнительных препятствий с заданной средней скоростью. При появлении на маршруте дополнительных преодолимых препятствий (ящик, канистра и проч.) робот при наличии возможности объезжал их на безопасном расстоянии. Если ширина дороги не позволяла объехать препятствие, то робот останавливался и передавал оператору сигнал аварийной остановки, включая сирену.

При появлении на маршруте подвижных препятствий (человек, автомобиль, собака и пр.) СЧУ идентифицировала их и передавала изображение оператору. Робот останавливался, включал сирену и ожидал заданный промежуток времени (одну минуту), а затем при исчезновении препятствия продолжал движение; если препятствие не исчезало, передавал управление оператору.

Таким образом, использование описанных аппаратных и программных средств, в целом, обеспечивало исполнение требуемого сценария передвижения НТП. При этом был выявлен ряд проблем.

5. Проблемы и их возможные решения

Позиционирование НТП при перемещении по маршруту осуществляется с использованием нескольких потоков данных: от инерциального модуля, от контроллеров двигателей, от лидара, стереокамеры и от ультразвуковых датчиков. Для обработки этих потоков используется фильтр Калмана, который синтезирует наиболее достоверные текущие координаты и скорости.

Быстрее всего ошибки позиционирования и скорости накапливаются в инерциальной системе (*IMU 10 DOF*). Используемые датчики позволяли рассчитывать эти величины с приемлемой точностью (менее десяти процентов от пройденного расстояния) при перемещениях до пяти метров. Для более точного позиционирования необходимы более точные и дорогие гироскопы и акселерометры. Их применение вряд ли оправдано, поскольку инерциальный модуль в данном случае не является единственным источником данных.

Более точная информация поступает с контроллеров двигателей (*VESC*). На ее основе пространственное положение НТП с хорошей точностью (в пределах 2-3 %) может определяться при перемещениях уже на 10—15 метров. Эти цифры существенно зависят от типа и состояния дорожного покрытия (асфальт, грунт, трава, лед, снег, влага и проч.). Также качество данных от *VESC* зависит от качества подвески НТП, наличия или отсутствия вибрации. Систематические ошибки, вносимые в показания контроллеров недостатками конструкции конкретного изделия, могут быть отфильтрованы при предварительных исследованиях и программно скомпенсированы. Однако попадание грязи и посторонних предметов в гусеницы, не говоря уже о повреждениях ходовой части в процессе движения, существенно искажают потоки данных от *VESC* и снижают точность определения пройденного пути.

Использовавшийся вариант *VESC*:

- позволял производить калибровку и настройку параметров активации двигателя;
- имел встроенный пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор для оборотов двигателя;
- обеспечивал их перепрограммирование посредством программы с графическим интерфейсом.

Среди минусов контроллера — трудность устранения ошибок в ходе работы. К примеру, в ходе экспериментов наблюдалась так называемая *bit-flip* ошибка чтения показаний энкодеров: вместо значения +32767 отсчетов *VESC* отправлял -32768, что сбивало алгоритмы вычисления одометрии. В рамках проведенных экспериментов обмен данными между микрокомпьютером и контроллером осуществлялся посредством шины *UART*, что является неоптимальной стратегией. Использование дифференциальной шины *CAN*, которая лучше защищена от помех и является стандартной в робототехнике, возможно, позволит избежать искажений при передаче данных.

Корректировка позиционирования НТП производилась по показаниям стереокамеры и лидара. Стереокамера *OAK-D Pro* обладает рядом важных положительных качеств, таких как: наличие встроенного модуля рас-

чета визуальных данных (*VPU*), встроенных алгоритмов фильтрации стереоизображений, возможности субпиксельного вычисления карты глубины. Текущий вариант стереокамеры теоретически позволяет выполнять построение карты глубины на расстоянии до 10 метров. В ходе испытаний было выявлено, что устойчиво наблюдаемая дальность составляет не более 6 метров, а в среднем 3—5 метров. Карта глубины, получаемая при помощи текущей стереокамеры, содержит шумовые выбросы, которые сбивают работу алгоритмов картирования и навигации.

Из проведенных экспериментов следует, что для надежной и безопасной работы НТП необходимо увеличить расстояние, которое отображается на карте глубины, до значений порядка 10—20 метров, что может быть достигнуто путем применения стереокамер с шириной базы 10—20 см. Преимуществом подобной системы будет использование широкоугольных объективов, позволяющих получать визуальную информацию в области дорожного полотна и в районе бортов НТП.

Для создания системы стереовидения возможны два варианта. Первый — использование стереокамеры в едином корпусе с аппаратной синхронизацией. Плюсом является наличие стереоизображений (а зачастую и сразу карты глубины) без дополнительных алгоритмов «из коробки». Минусы заключаются в трудности заказа подобного изделия на территорию РФ, проблемах кастомизации подобных компонентов при необходимости изменить базу стереокамеры, скрытость параметров и алгоритмов работы встроенного вычислителя. Второй — применение распределенной системы камер по периметру НТП. Для оптимальной работы необходимы пять камер по периметру: две спереди (синхронизированные аппаратно) и три по трем другим бортам НТП. Обязательным условием к таким камерам является передача данных через *Ethernet*-кабель. Потоки данных от 5 камер могут направляться на высокоскоростной *Ethernet*-свитч, который в дальнейшем будет отправлять кадры на основной вычислительный модуль. Для достижения бесперебойной отправки — приема кадров от системы камер потребуется стандарт *Ethernet* не менее 2.5G.

Использовавшийся лидар *RPLIDAR A1M8* предназначен для помещений. Тем не менее, данный образец, ввиду сильно ограниченной дальности видения стереокамеры, позволял осуществлять локализацию НТП. В ходе испытаний дальность обнаружения препятствий при помощи данного лидара составляла величину 8—10 метров. Было продемонстрировано, что при создании подобных НТП для нужд картирования и навигации целесообразно использовать как изображения с камер, так и облака точек с лидара.

Для совершенствования лидарной системы НТП необходима установка многолучевого лидара с дальностью видимости не менее 20 метров

и встроенной инерциальной системой. Подобный симбиоз данных от лазерного дальномера и инерциальных данных позволяет использовать лазерно-инерциальные алгоритмы вычисления одометрии (например, *FAST-LIO2* [14]), которые существенно улучшают качество локализации и картирования. Также с целью регистрации низковысотных препятствий (бордюров, неровностей, животных) имеет смысл установка дополнительного однолучевого лидара, аналогичного *A1M8*, ближе к дну НТП. Подобные устройства позволяют существенно улучшить качество картирования и навигации. Для достижения наилучшего быстродействия и защиты от внешних наводок они должны подключаться к вычислителю посредством *Ethernet*-кабелей. Более того, для упрощения монтажных работ целесообразно использовать *PoE* (*Power over Ethernet* — питание через *Ethernet*) соединение, позволяющее осуществлять как передачу данных от камер/лидара, так и запитывать их энергией.

Данные глобальных навигационных спутниковых систем *GPS/GLONASS* часто пытаются использовать для уточнения пространственного позиционирования наземных роботов [15]. Наши эксперименты показали, что точность определения координат при помощи этих систем не превышает 10 м, чего совершенно недостаточно для автономного передвижения НТП по территории промышленного предприятия. Кроме того, сигналы *GPS/GLONASS* не всегда доступны и могут быть подменены, что снижает безопасность эксплуатации робота.

В рассматриваемом варианте СНУ использовалось шесть ультразвуковых датчиков *URM37 v5.0*. Преимуществом этой модели является возможность подключения датчиков как через *UART*, так и через пару сигналов *Trigger-Echo*. Эти сенсоры могут выдавать дальность в широком диапазоне от 3 до 800 см. Телесный угол обзора составляет приблизительно 30—40 градусов, что позволяет покрывать значительные области пространства при помощи небольшого количества датчиков.

Однако, данные датчики обладают рядом недостатков, которые были выявлены в ходе экспериментов с НТП:

- из-за отсутствия частотной дифференциации и широкого телесного угла излучаемых ультразвуковых сигналов возникают сильные перекрестные помехи между соседними датчиками, что особенно сильно проявляется в узких пространствах;

- имеются сложности с отладкой устойчивого обмена данными по цепи *OrangePi – STM32 – URM37 (x6)*, точная причина так и не была установлена, однако весьма вероятно, что проблема связана с чувствительностью передатчика (*Tx*) на микросхеме *URM37* к помехам на заземляющем контакте.

Для устранения первой проблемы датчики активируются последовательно с интервалом ожидания 50 мс, что значительно снижает скорость обновления данных, которая составила в ходе экспериментов 3–4 Гц.

Для исключения второй проблемы необходима разработка специального модуля, обеспечивающего общее питание всех устройств робота от одного источника с общей землей. Этот модуль должен обеспечивать поддержку режимов работы всех компонентов и фильтрацию взаимных наводок.

В ходе экспериментов по картированию и локализации пространства было установлено, что мощности текущего микрокомпьютера *Orange Pi 5 Plus* недостаточно для построения карты больших размеров (порядка нескольких квадратных километров) с высоким уровнем детализации. Мощности также не хватает и для алгоритмов навигации, которые не успевают обработать данные от множества сенсоров. В ходе тестов среднее время обновления информации об окружающей среде составляло 300–500 мс. Этот показатель не приемлем для осуществления безопасного и быстрого движения НТП. Максимальным значением времени обновления информации следует считать 100 мс, что позволит своевременно принимать решения о перемещении НТП до возникновения аварийных ситуаций даже в случае внезапного появления препятствий на пути следования.

В качестве решения проблемы предлагается замена текущего микрокомпьютера на вычислительный комплекс с выделенной *GPU* для обработки изображений от камер, облака точек от лидара и использования нейросетей. Есть два варианта.

Первый — установка промышленного мини-ПК. К плюсам такого решения можно отнести относительную дешевизну и большую вычислительную мощность процессора. К минусам — отсутствие встроенного расширителя для *GPIO*, что затрудняет использование устройств с подключением через *UART*, *I2C*, *CAN* и прочих шин передачи данных. Конечно, подобная проблема может быть решена посредством установки расширяющей платы, но это решение будет не таким надежным, как использование встроенного интерфейса *GPIO*.

Второй — установка передовых микрокомпьютеров *Nvidia* (например, *Orin 64GB*). Функциональных плюсов у подобного устройства достаточно много: 10G интерфейс *Ethernet*; объединенная *RAM*-память как для *CPU*, так и для *GPU*; мощный *GPU*; разумное энергопотребление (порядка 50 ватт); наличие встроенного интерфейса *GPIO* (с готовыми реализациями *UART*, *CAN* и прочих шин данных). В подобных устройствах вычисление карты окружающего пространства производится на *GPU* в рамках фреймворка *CUDA*. Нюансом (не минусом) подобного вычислителя явля-

ется нетривиальность написания алгоритмов обработки видеок кадров, картирования, навигации, нейросетевых моделей на языке *CUDA*.

Минусами компьютера *Nvidia* являются высокая стоимость, а самое главное — отсутствие гарантированной поставки, обусловленное политической компании производителя.

В рамках экспериментов были отмечены трудности, связанные с передачей большого количества данных по так называемым топикам (программным путям передачи данных) в системе *ROS2*. Например, передача изображений формата $1920 \times 1080 \times 3$ (*RGB*) с частотой не менее 10 кадров в секунду весьма затруднена на микрокомпьютере *Orange Pi 5 Plus*, что связано с недостаточной поточной производительностью процессора *Orange Pi 5 Plus*, которая требуется для обеспечения передачи больших объемов данных по топикам *ROS2*. Поэтому в рамках испытаний разрешение как *RGB*-кадров, так и кадров глубины, было уменьшено до 640×480 . На использовавшемся оборудовании это не привело к серьезному ухудшению качества картирования и навигации, поскольку малая база стереокамеры не позволяет получать надежную информацию о дальности на расстояниях выше 5–6 метров.

Однако, как уже отмечалось, для надежного и безопасного автономного перемещения необходима карта глубины 10—20 метров. Причем, если будет использоваться широкоугольный объектив (что желательно с целью увеличения угла обзора), то потребуется камера с разрешением 1920×1080 для того, чтобы покрыть угол обзора достаточным количеством пикселей. Поэтому важно, чтобы пропускной способности топиков было достаточно для бесперебойной передачи кадров от камер.

Необходимо отметить и важные преимущества *ROS2*. Это программное обеспечение представляет собой набор готовых и отлаженных инструментов, позволяющих создавать сложные схемы взаимодействия различных программных модулей. Для *ROS2* существует множество различных алгоритмов картирования и навигации, которые могут выбираться в соответствии с решаемыми задачами. Написание программного обеспечения, функционально аналогичного *ROS2*, займет большое количество времени и ресурсов, и нет гарантии, что в результате получится что-то, работающее быстрее и надежнее, чем текущая реализация *ROS2*. Поэтому рассматривать переход с *ROS2* на некоторое подобное и самостоятельно реализованное ПО на наш взгляд нецелесообразно.

6. Заключение

Проведенные исследования показали, что, используя доступные аппаратные компоненты и свободно распространяемое программное обеспе-

чение, можно разработать систему навигации и управления наземной транспортной платформы, обеспечивающую:

- формирование в автоматизированном режиме маршрутов передвижения НТП;

- автономное и безопасное для других участников движения передвижение НТП по заранее определенному маршруту.

Используя информацию от различных источников СНУ способна автоматически в режиме реального времени определять координаты и ориентацию НТП в покое и при передвижении, обнаруживать препятствия на маршруте и обеспечивать их преодоление.

При модернизации аппаратной платформы СНУ могут быть достигнуты следующие показатели:

- точность определения координат НТП до 0,5 м;
- точность определения скорости НТП до 0,03 м/с;
- точность пространственной ориентации (на плоскости) до 5 градусов.

- передвижения НТП со скоростью от 3 до 10 км/час (от 0,8 до 2,8 м/с);
- передвижение с регулируемым минимальным расстоянием до препятствий, начиная от 0,5 м и более;

- время реакции на окружающую обстановку 0,1 с.

Источники финансирования и выражение признательности

Работа выполнена в рамках НИР «Скарабей» НПП «Исток им. Шокина».

Список литературы

1. Юревич Е. И. Основы робототехники. 4-е изд. М. : BHV, 2020. 252 с.
2. Артоболовский И. И. Русский изобретатель и конструктор Кулибин. М. : Воениздат МО СССР, 1947. 32 с.
3. Пипуныров В. Н., Чернягин Б. М. Развитие хронометрии в России М. : Наука, 1977. 216 с.
4. Коллективы интеллектуальных роботов. Сферы применения / Под редакцией д. т. н., проф. В. И. Сырямкина. Томск : STT, 2018. 140 с.
5. Лопота А. В., Николаев А. Б. Наземные робототехнические комплексы военного и специального назначения. СПб. : ЦНИИ РТК, 2015. 30 с.
6. Макаренко С. И. Робототехнические комплексы военного назначения — современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 2. С. 73—132.
7. Lin P., Bekey G., Abney K. Autonomous Military Robotics: Risk, Ethics, and Design // US Department of Navy, Office of Naval Research. 2008. 108 p.
8. Власов С. М., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В. Бесконтактные средства локальной ориентации роботов. СПб. : ИТМО, 2017. 170 с.
9. Morales Y., Carballo A., Takeuchi E., Aburadani A., Tsubouchi T. Autonomous Robot Navigation in Outdoor Cluttered Pedestrian Walkways // Journal of Field Robotics. 2009. Vol. 26, no 8. P. 609–635.

10. Akai N., Hirayama T., Morales Y., Murase H. Hybrid System for Autonomous Mobile Robot Navigation: End-to-End and Model-based Approaches // *Journal of Robotics and Mechatronics (JRM)*. 2018. Vol. 30, no. 4. P. 563–583.
11. Dinh T. X., Huong N. T. T. et al. Motion planning and control of an autonomous mobile robot // *Mathematics and Computer Science*. 2023. Vol. 65, no. 4. P. 3–10.
12. Ал-Хафаджи И. М. А. Разработка систем управления автономными мобильными роботами // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2024. Т. 21, № 7. С. 13–20.
13. Азарнов Н. В., Кашицын С. Д., Баринов А. П., Ефимов А. Е., Михайлов П. О. Система управления наземными мобильными роботами // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2025. № 3. С. 67–72.
14. Xu W., Cai Y., He D., Lin J., Zhang F. Fast-lid2 : Fast direct lidar-inertial odometry // *IEEE Transactions on Robotics*. 2022. Vol. 38(4). P. 2053–2073.
15. Liu S., Li L., Tang J., Wu S., Gaudiot J.-L. Creating autonomous vehicle systems. Morgan & Claypool, 2018. 185 p.

Информация об авторах

Азарнов Никита Владимирович, инженер, АО «НПП “Исток” им. Шокина», Московская обл., г. Фрязино, Российская Федерация.

Кашицын Сергей Дмитриевич, администратор проектов, АО «НПП “Исток” им. Шокина», Московская обл., г. Фрязино, Российская Федерация; преподаватель филиала РТУ МИРЭА в г. Фрязино, Российская Федерация.

Михайлов Павел Олегович, аспирант, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Российская Федерация; инженер-программист АО «НПП “Радиотехника”», г. Москва, Российская Федерация.

Обухов Илья Андреевич, доктор физико-математических наук, технический директор АО «НПП “Радиотехника”», г. Москва, Российская Федерация; профессор филиала РТУ МИРЭА в г. Фрязино, Российская Федерация.

Some Problems of Ground Transportation Platform Autonomous Navigation

N. V. Azarnov¹, S. D. Kashitsyn^{1,2}, P. O. Mikhailov^{3,4}, and I. A. Obukhov^{2,4}

¹Scientific-Industrial Company “Istok” n. a. Shokin,
Friazino, Russian Federation

nvazarnov@istokmw.ru

²Filial RTU MIREA in Friazino,
Friazino, Russian Federation

³M. V. Lomonosov Moscow State University, Physical Faculty
Moscow, Russian Federation

⁴Scientific-Industrial Company “Radiotechnika”
Moscow, Russian Federation

pm@npprt.ru, ia@npprt.ru

Received: March 13, 2026

Peer-reviewed: March 20, 2026

Accepted: March 20, 2026

Abstract: The results of an experimental research of the possibility an autonomous ground robot designed for outdoor use based on available components creation are presented. It is shown that such possibility exists. The main problems of navigation and control of the robot are highlighted. The problems solutions have been identified.

Keywords: robotics, ground-based mobile robots, adaptive robots, spatial orientation, positioning, navigation, control.

For citation (IEEE): N. V. Azarnov, S. D. Kashitsyn, P. O. Mikhailov, and I. A. Obukhov “Some Problems of Ground Transportation Platform Autonomous Navigation,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 3, pp. 417–433, 2026, doi: 10.21227/t904-p242. (In Russ.).

References

- [1] E. I. Yurevich, *Osnovi robototekhniki*, iss. 4, Moscow: BHV, 2020. (In Russ.).
- [2] I. I. Artobolevsky, *Russkii izobretatel i konstruktor Kulibin*, Moscow: Voenizdat MO USSR, 1947. (In Russ.).
- [3] V. N. Pipunirov and B. M. Cherniagin, *Razvitie chronometrii v Rossii*, Moscow: Nauka, 1977. (In Russ.).
- [4] *Kollektivi intellektualnich robotov. Sferi primeneniya*, ed. V. I. Syryamkin, Tomsk: STT, 2018. (In Russ.).
- [5] A. V. Lopota and A. B. Nikolaev, *Nazemnie robototekhnicheskie kompleksi voennogo i specialnogo naznacheniya*, S. Peterburg: CNII RTK, 2015. (In Russ.).
- [6] S. I. Makarenko, “Military Robots – the Current State and Prospects of Improvement,” *Systems of Control, Communication and Security*, no 2, pp. 73–132, 2016. (In Russ.).

- [7] P. Lin, G. Bekey, and K. Abney, *Autonomous Military Robotics: Risk, Ethics, and Design*, US Department of Navy, Office of Naval Research, 2008.
- [8] S. M. Vlasov, V. I. Boykov, S. V. Bistrov, and V. V. Grigor'ev, *Beskontaktnie sredstva lokalnoi orientatsii robotov*, St.-Petersburg: ITMO, 2017. (In Russ.).
- [9] Y. Morales, A. Carballo, E. Takeuchi, A. Aburadani, and T. Tsubouchi, "Autonomous Robot Navigation in Outdoor Cluttered Pedestrian Walkways," *Journal of Field Robotics*, vol. 26, no 8, pp. 609–635, 2009.
- [10] N. Akai, T. Hirayama, Y. Morales, and H. Murase, "Hybrid System for Autonomous Mobile Robot Navigation: End-to-End and Model-based Approaches," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 30, no. 4, pp. 563–583, 2018.
- [11] T. X. Dinh, N. T. T. Huong, et al., "Motion planning and control of an autonomous mobile robot," *Mathematics and Computer Science*, vol. 65, no 4, pp. 3–10, 2023.
- [12] I. M. Al-Khafaji, "Abdalameer. Development of autonomous mobile robots control systems," *Herald of Computer and Information Technologies*, vol. 21, no 7, pp. 13–20, 2024. (In Russ.).
- [13] N. V. Azarnov, S. D. Kashitsyn, A. P. Barinov, A. E. Efimov, and P. O. Mikhailov, "Control system for ground mobile robots", *Measuring. Monitoring. Management. Control*, vol. 3, pp. 67–72, 2025. (In Russ.).
- [14] W. Xu, Y. Cai, D. He, J. Lin, and F. Zhang, "Fast-lio2: Fast direct lidar-inertial odometry," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 38(4), pp. 2053–2073, 2022.
- [15] S. Liu, L. Li, J. Tang, S. Wu, and J.-L. Gaudiot, *Creating autonomous vehicle systems*, Morgan & Claypool, 2018.

Information about the authors

Nikita V. Azarnov, Engineer, JSC NPP "Istok" n. a. Shokin, Fryazino, Russian Federation.

Sergey D. Kashitsyn, Project administrator, JSC NPP "Istok" n. a. Shokin, Fryazino, Russian Federation; lecturer of Filial RTU MIREA, Fryazino, Russian Federation.

Pavel O. Mikhailov, postgraduate student, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russian Federation; software engineer, JSC NPP "Radiotekhnika", Moscow, Russian Federation.

Ilya A. Obukhov, D.Sc. (Physics and Mathematics), Technical Director of JSC NPP "Radiotekhnika", Moscow; professor of Filial RTU MIREA, Fryazino, Russian Federation.

Алгоритм межмодуляционной обработки сигналов в ММО радиолокаторах

Мелёшин Ю. М.

НИУ «МИЭТ»

пл. Шокина, д. 1, г. Зеленоград, г. Москва, 124498, Российская Федерация

i@imyt.ru

Получено: 19 марта 2026 г.

Отрецензировано: 26 марта 2026 г.

Принято к публикации: 26 марта 2026 г.

Аннотация: В работе рассмотрены вопросы оптимального формирования сигнально-кодовых конструкций в ММО радиолокаторах с учетом борьбы с паразитными составляющими в спектре скоростей целей, возникающих в ММО радиолокаторах с линейной частотной модуляцией и медленной фазокодовой манипуляцией. Рассмотрены существующие подходы в области устранения неоднозначности определяемой скорости и предложен алгоритм межмодуляционной обработки сигналов, который обеспечивает устранение неоднозначности определяемой скорости за счет совместной обработки двух сигнально-кодовых конструкций с различными способами разделения каналов: фазокодовым и комбинированным. Показано, что применение данного алгоритма позволяет сохранить предельные параметры ММО радиолокатора по разрешающей способности по дальности и радиальной скорости и при этом обеспечивает полный диапазон однозначно определяемых радиальных скоростей.

Ключевые слова: ММО радиолокатор, РЛС, FMCW, BPSK, межмодуляционная обработка, цифровая обработка сигналов.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Мелёшин Ю. М. Алгоритм межмодуляционной обработки сигналов в ММО радиолокаторах // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2026. Т. 9, № 3. С. 434—450.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Мелёшин, Ю. М. Алгоритм межмодуляционной обработки сигналов в ММО радиолокаторах / Ю. М. Мелёшин // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2026. — Т. 9, № 3. — С. 434—450.

1. Введение

В настоящее время актуальными являются исследования в области алгоритмов формирования и обработки сигналов в радиолокационных

станциях с множественным входом и множественным выходом (от англ. «multiple-input multiple-output», далее — МИМО РЛС), в частности, с разделением каналов за счет непрерывной частотной модуляции с медленной фазокодовой манипуляцией (НЧМ и МФКМ) [1] и только фазокодовой манипуляцией (ФКМ) [2]. В МИМО РЛС с НЧМ и ФКМ существует известная проблема появления дополнительной неоднозначности определения радиальной скорости цели из-за размножения отклика обобщенной функции неопределенности (ОФН) $N_{\text{прд}}$ раз, где $N_{\text{прд}}$ — количество передающих каналов РЛС. Многие подходы компенсации фазовых искажений строятся на базе ранее известных в науке и технике алгоритмов устранения какой-либо неоднозначности, также существуют алгоритмы, построенные на основе единовременной обработки различных пачек импульсов или временных поддиапазонов одной последовательности сигналов. Рассмотрим основные существующие подходы, которые используются в МИМО РЛС с НЧМ и ФКМ.

Метод на основе китайской теоремы об остатках (CRT).

Метод на основе китайской теоремы об остатках (*Chinese Remainder Theorem, CRT*) относится к числу традиционных способов разрешения доплеровской неоднозначности в РЛС [3]. Его идея состоит в том, чтобы выполнить несколько измерений доплеровского сдвига с разными частотами повторения импульсов (ЧПИ) так, чтобы максимальный диапазон однозначно определяемых скоростей в каждом измерении был различным. В простейшем варианте используются три последовательных пачки импульсов (измерения скорости) с разными неоднозначными диапазонами скорости, но одинаковой разрешающей способностью по скорости.

Такой алгоритм обработки позволяет сосредоточить энергию сигнала в верном доплеровском отсчете и затем оценить угол прихода цели стандартными методами, как если бы доплеровская неоднозначность отсутствовала.

Однако на практике даже незначительные несовпадения параметров могут привести к сбою алгоритма *CRT*. Требование точно равной разрешающей способности по скорости в разных кадрах сложно выполнить; даже относительно малые рассогласования разрешающей способности или ошибки округления индексов доплеровских откликов могут вызвать неверное срабатывание.

Еще одним недостатком *CRT*-метода является необходимость сбора трех отдельных кадров измерений. Это увеличивает временную задержку обновления информации о цели (пока не будут накоплены все три последо-

вательных пачки импульсов) и накладывает дополнительные ограничения на аппаратную реализацию РЛС (необходимо гибко менять длительность пачек импульсов и временные задержки между ЛЧМ импульсами в разных пачках). В условиях быстро меняющейся обстановки и жестких требований ко времени отклика системы (например, в случае автомобильных РЛС переднего обзора) высокая задержка может быть неприемлема. Таким образом, хотя метод *CRT* и задает эталонную точность в отсутствие ошибок, на практике его робастность (свойство метода/алгоритма сохранять приемлемое качество работы, эффективность и устойчивость к помехам, ошибкам или неопределенности во входных данных, параметрах или условиях, не теряя при этом своей функциональности) невысока, и метод может потерять работоспособность при малейших отклонениях условий или параметров.

Алгоритм пространственной кластеризации на основе плотности (DBSCAN).

С целью повышения робастности алгоритма *CRT* в [4] предложен гибридный подход, сочетающий идеи *CRT* с методами пространственной кластеризации данных. Он основан на применении алгоритма *DBSCAN* (от англ. «*Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*») для поиска согласованного решения по доплеровским измерениям из нескольких пачек импульсов. *DBSCAN* — это известный алгоритм кластеризации для выделения кластеров произвольной формы в данных, особенно при наличии шумовых выбросов. Кластер определяется как область повышенной плотности точек, отделенная от других областей разреженными областями. Алгоритм использует два основных параметра: радиус окрестности (ϵ), определяющий максимальное расстояние между точками для их отнесения к одному кластеру, и минимальное число точек в кластере ($MinP$), определяющее порог плотности для образования кластера. Если в окрестности некоторой точки находится не менее $MinP$ точек, то эта точка считается основной и вокруг нее формируется кластер; точки, достижимые из основной через цепочку соседних точек, также включаются в кластер. Не принадлежащие кластерам точки считаются шумом.

В рассматриваемой задаче устранения неоднозначности данные для кластеризации формируются из трех измерений доплеровского сдвига той же цели, полученных в трех гетерогенных кадрах *A*, *B*, *C*. Однако, в отличие от *CRT*, данный подход не пытается вычислить истинную скорость аналитически, а ищет групповую близость между измерениями трех кадров в пространстве возможных скоростей. Если представить каждое измерение доплеровской частоты как точку, определяющую множество возможных истинных скоростей (за счет добавления или вычитания кратных

2π фазовых циклов, эквивалентных шагам скорости ΔV_r), то истинная скорость должна проявиться как пересечение этих множеств для трех разных длин пачек импульсов.

Алгоритм *DBSCAN* как раз и предназначен для выявления такой общей области пересечения через кластеризацию. Однако у исходного варианта метода *DBSCAN* есть и ограничения. Во-первых, для получения одного результата требуются данные трех последовательных кадров — как и в *CRT*, это увеличивает задержку обновления информации (результат появляется раз в три пачки импульсов). Во-вторых, возможна ситуация, когда в разных кадрах обнаружено разное число отражений от цели. Например, цель может быть выявлена в кадре *B* дважды (две точки, возможно от двух близких отражающих частей), а в кадрах *A* и *C* — по одному разу. В-третьих, если в одном из трех кадров цель вовсе не обнаружена (например, ушла за порог чувствительности или подавлена помехой), то для данной цели не удастся собрать три измерения, и метод *DBSCAN* не сможет разрешить ее неоднозначность — она останется неправильно сложенной. Наконец, использование кластеризации добавляет вычислительную нагрузку: хотя объем данных невелик, требуется перебор точек и вычисление расстояний между ними. Тем не менее, данный метод или его модификации нашли широкое применение в *МИМО* РЛС [5—10].

Метод гипотетической компенсации фазы (HPC).

Вышеописанные методы (*CRT* и *DBSCAN*) требуют сбора нескольких пачек импульсов с различными параметрами ЧПИ для восстановления истинной скорости. Это увеличивает время получения решения и предъявляет жесткие требования к согласованию параметров сигнала между пачками. Метод гипотетической компенсации фазы (*HPC*, от англ. «*Hypothetical Phase Compensation*») — альтернативный метод, выполняющий разрешение неоднозначности доплеровского сдвига в пределах одной единственной пачки импульсов. Данный подход был предложен и исследован в ряде работ [11—13].

Чтобы преодолеть выявленные ограничения и улучшить характеристики системы, предлагается исследовать и разработать алгоритм компенсации фазовых искажений в *МИМО* РЛС с НЧМ и МФКМ на базе межмодуляционной обработки.

2. Описание алгоритма межмодуляционной обработки сигналов

Предлагаемый алгоритм основан на совместной корреляционной обработке сигналов НЧМ с МФКМ и ФКМ, стремясь сохранить преимущества каждого из способов разделения и устранить недостатки.

Так, у ММО РЛС на базе кодового разделения формируются наиболее высокие требования к полосе единовременно формируемого и обрабатываемого сигнала (что накладывает соответствующие высокие требования к аппаратной реализации в части АЦП и вычислительной способности центрального вычислителя), преимуществом таких систем при этом является более гибкая настройка многомерной ОФН за счет использования частичной кросс-корреляции [2].

В ММО РЛС на базе сигналов с НЧМ и ФКМ основным преимуществом является архитектура, в которой оцифровывается не вся рабочая полоса сигнала единовременно, а только сигнал биения, получаемый за счет линейного изменения частоты и излучаемого сигнала и опорного сигнала гетеродина.

В данном разделе предлагается совместить оба описанных режима работы, чтобы добиться эффективного устранения возникающих искажений и при этом сохранить низкие требования к аппаратной реализации РЛС за счет исследования и разработки алгоритма межмодуляционной обработки сигналов (АМО).

Описание АМО.

Шаг 1. Согласование сигнально-кодовых конструкций. Для обеспечения сопоставимости по доплеровскому смещению частоты и сечению ОКИ и ОФН по скорости необходимо выбрать одинаковыми следующие параметры НЧМ и ФКМ пачек импульсов: длительность зондирующей пачки импульсов ($\tau_{\text{цикл}}$) и количество импульсов ($N_{\text{имп}}$). Это обеспечивает равный максимальный диапазон определения скоростей (без учета неоднозначности из-за фазовых искажений в НЧМ режиме):

$$\Delta f_D = \frac{1}{2\tau_{\text{имп}}}, \Delta V_r = \frac{\lambda}{2} \Delta f_D = \frac{\lambda}{4\tau_{\text{имп}}}. \quad (1)$$

Шаг 2. Выравнивание размерностей массивов данных. Для выполнения дальнейших операций без дополнительной интерполяции или преобразования размерности данных необходимо сразу определить размерности данных в области частоты/скорости N_D и в области дальности/времени N_R , причем, поскольку в обеих областях выполняются операции БПФ, то необходимо стремиться выбирать значения кратные степени двойки, и $N_D \geq N_{\text{имп}}$. Также на данном этапе введем общие индексы для описания АМО:

- $j = 1, \dots, N_{\text{прм}}$ — индекс приемного канала;
- $m = 1, \dots, N_{\text{прд}}$ — индекс передающего канала;
- $k = 0, \dots, N_{\text{имп}} - 1$ — индекс импульса (рампы/чирпа);

- $n = 0, \dots, N_R - 1$ — индекс ячейки дальности (задержки);
- $l = 0, \dots, N_D - 1$ — индекс ячейки скорости (доплеровской частоты);
- $p = 1, \dots, N_{\text{прм}}$ — индекс приемного канала.

Исходные (сырые) данные с АЦП, записанные для каждого цикла записи и приемника j запишем как:

$$y_j[r, k], r = 0, \dots, N_{\text{зап}} - 1, \quad (2)$$

где $N_{\text{зап}} = \tau_{\text{имп}} \cdot f_d$ — число отсчетов в одном импульсе.

Шаг 3. Выделение парциальных откликов для всех пар передатчик — приемник (сигналов виртуальной антенной решетки):

Входные данные: $\{y_j[r, k]\} \in \mathbb{C}^{N_{\text{зап}} \times N_{\text{имп}} \times N_{\text{прм}}}$ — данные с АЦП.

Выходные данные: $\mathbf{Z}[n, k, j, m] \in \mathbb{C}^{N_R \times N_{\text{имп}} \times N_{\text{прм}} \times N_{\text{прд}}}$ — сигналы ВАР.

Описание операций с ФКМ сигналами:

Для каждого j, m, k выполняется свертка с модулирующими ПСП передатчиков $s_m[\cdot]$:

$$z_{j,m}^{\text{ФКМ}}[n, k] = \sum_r y_j^{\text{ФКМ}}[r, k] s_m^*[r - n] \quad (3)$$

Описание операций с НЧМ сигналами:

Первым этапом на данном шаге выделяем парциальные отклики от всех передатчиков за счет восстановления фазы в соответствии с двоичными последовательностями ПРД $s_{m.\text{нчм}}[\cdot]$:

$$\tilde{y}_j[r, k] = y_j[r, k] \cdot s_{m.\text{нчм}}^*[r], \quad (4)$$

затем выполняем БПФ размерностью N_R :

$$z_{j,m}^{\text{НЧМ}}[n, k] = \text{FFT}_{N_R}\{\tilde{y}_j[\cdot, k]\}. \quad (5)$$

Шаг 4. Формирование сигналов виртуальной антенной решетки.

Входные данные: $\mathbf{Z}[n, k, j, m] \in \mathbb{C}^{N_R \times N_{\text{имп}} \times N_{\text{прм}} \times N_{\text{прд}}}$ — сигналы ВАР.

Выходные данные: $\mathbf{z}_{\text{ВАР}}[n, k, i] \in \mathbb{C}^{N_R \times N_{\text{имп}} \times (N_{\text{прм}} \cdot N_{\text{прд}})}$ — преобразованные сигналы ВАР.

Для универсальной записи сигналов ВАР удобно сформировать линейную нумерацию элементов ВАР $i = (m - 1)N_{\text{прм}} + j$ (длиной $N_{\text{ВАР}} = N_{\text{прд}}N_{\text{прм}}$), тогда данные ВАР можно представить в виде :

$$\mathbf{z}_{\text{ВАР}}[n, k, i] = \mathbf{Z}[n, k, j, m]. \quad (6)$$

Шаг 5. Пространственная обработка.

Входные данные: $\mathbf{z}_{\text{ВАР}}[n, k, i] \in \mathbb{C}^{N_R \times N_{\text{имп}} \times (N_{\text{прм}} \cdot N_{\text{прд}})}$ — преобразованные сигналы ВАР.

Выходные данные: $u[n, k, p, q] \in \mathbb{C}^{N_R \times N_{\text{имп}} \times N_{\text{прм}} \times N_{\text{прд}}}$ — пространственное распределение.

В зависимости от координат расположения приемных и передающих антенных элементов антенной системы РЛС далее применяется один из алгоритмов пространственной обработки.

Для случая произвольного расположения элементов можно использовать цифровое формирование необходимого количества пространственных лучей:

$$u[n, k, \beta, \varepsilon] = \sum_{i=1}^{N_{\text{ВАР}}} \mathbf{z}_{\text{ВАР}}[n, k, i] a_i^*(\beta, \varepsilon), \quad (7)$$

где $a_i(\beta, \varepsilon)$ — вектора управления цифровыми лучами (эквивалентны требуемым амплитудно-фазовым распределениям).

Для случая, когда ВАР формирует эквидистантную прямоугольную антенную решетку, удобно использовать БПФ для формирования пространственного распределения целей:

$$u[n, k, p, q] = \text{FFT}_{N_{\text{прм}}, N_{\text{прд}}} \{ \mathbf{Z}[n, k, \cdot, \cdot] \}. \quad (8)$$

Шаг 6. Доплеровская обработка.

Входные данные: $u[n, k, p, q] \in \mathbb{C}^{N_R \times N_{\text{имп}} \times N_{\text{прм}} \times N_{\text{прд}}}$ — пространственное распределение.

Выходные данные: $U[n, k, p, q] \in \mathbb{C}^{N_R \times N_D \times N_{\text{прм}} \times N_{\text{прд}}}$ — пространственное распределение целей.

Для выполнения селекции движущихся целей и первичного определения скоростей целей выполняется БПФ по импульсам размерностью N_D :

$$U[n, k, p, q] = \sum_{k=0}^{N_{\text{имп}}-1} u[n, k, p, q] e^{-j2\pi \frac{l}{N_D} k}, l = 0 \dots N_D - 1. \quad (9)$$

Шаг 7. Межмодуляционная обработка.

Входные данные:

$U^{\text{ФКМ}}[n, k, p, q], U^{\text{НЧМ}}[n, k, p, q] \in \mathbb{C}^{N_R \times N_D \times N_{\text{прм}} \times N_{\text{прд}}}$ — пространственные распределения целей для двух типов модуляции.

Выходные данные: $U^{\text{АМО}}[n, k, p, q] \in \mathbb{C}^{N_R \times N_D \times N_{\text{прм}} \times N_{\text{прд}}}$ — пространственное распределение целей после выполнения АМО, готовое к

применению алгоритмов детектирования и другой стандартной цифровой обработке сигналов в РЛС.

Междоупляционная обработка в части объединения $U^{\text{ФКМ}}$ и $U^{\text{НЧМ}}$ может выполняться различными способами, в частности, в рамках данной работы в следующем разделе будут рассмотрены следующие способы: фазо-компенсированное суммирование, оптимальное линейное объединение, совместный максимум правдоподобия и проекционная обработка.

3. Описание и сравнение способов междоупляционной обработки в АМО

Самый простой в реализации способ совместной обработки заключается в использовании $U^{\text{ФКМ}}$ для получения маски подтверждения наличия целей $M_i^{\text{ФКМ}}$, так как данный набор данных не будет содержать дополнительных максимумов в сечении скорости, возникающих из-за фазовых искажений; тогда для каждого направления $i = 1, \dots, N_{\text{ВАР}}$ можно сформировать двумерную маску подтверждения, при этом можно использовать как более сложные алгоритмы детектирования (например, с поддержанием постоянного уровня ложных тревог), так и простое пороговое детектирование. Тогда объединение для порогового детектирования по порогу T можно записать:

$$\begin{aligned} M_i^{\text{ФКМ}}[n, k] &= 1\{U_i^{\text{ФКМ}} > T_i^{\text{ФКМ}}\}, \\ M_i^{\text{НЧМ}}[n, k] &= 1\{U_i^{\text{НЧМ}} > T_i^{\text{НЧМ}}\}, \\ M_i^{\cap}[n, k] &= M_i^{\text{ФКМ}}[n, k] \cap M_i^{\text{НЧМ}}[n, k], \\ U_i^{\text{АМО}}[n, k] &= U_i^{\text{НЧМ}}[n, k] \cdot M_i^{\cap}[n, k]. \end{aligned} \tag{10}$$

Таким образом, после выполнения представленных операций будет получено пространственное распределение целей $U^{\text{АМО}}[n, k, p, q] \in \mathbb{C}^{N_R \times N_D \times N_{\text{прм}} \times N_{\text{прд}}}$, полученное на базе НЧМ режима, маскированное ФКМ режимом.

Ключевым недостатком такого способа является то, что при маскировании не происходит рост отношения сигнал/шум откликов от целей, вследствие чего можно говорить о том, что с точки зрения задачи максимизации отношения сигнал/шум (а, следовательно, и вероятности правильного обнаружения целей) данный способ будет в 2 раза менее эффективным, чем способы, построенные на основе когерентной обработки всех зондирующих сигналов.

Таким образом, необходимо рассмотреть способы, позволяющие обрабатывать $U^{\text{ФКМ}}$ и $U^{\text{НЧМ}}$ так, чтобы у результата обработки $U^{\text{АМО}}$ отношение сигнал/шум было оптимальным (в пределе — выросло в 2 раза по отношению к отношению сигнал/шум в $U^{\text{ФКМ}}$ и $U^{\text{НЧМ}}$).

Способ 1. Фазо-компенсированное суммирование (ФКС).

Способ заключается в суммировании $U^{\text{ФКМ}}$ и $U^{\text{НЧМ}}$, однако, ввиду разных СКК в данных режимах фаза полученных откликов также будет различна, следовательно, перед суммированием значений откликов необходимо привести фазы значений сигналов. Введем детерминированную фазовую компенсацию НЧМ как функцию от отсчета дальности n :

$$\tilde{U}^{\text{НЧМ}}[n, k, p, q] = U^{\text{НЧМ}}[n, k, p, q]e^{j\phi(n)}, \quad (11)$$

где $\phi(n)$ рассчитывается и выбирается из аналитической модели НЧМ режима (включая компенсацию значений, возникающих из-за изменения частоты $-2\pi f_{\text{ц}}\tau$ и $-\pi S\tau^2$). После чего выполняется обычное сложение:

$$U^{\text{АМО}}[n, k, p, q] = U^{\text{ФКМ}}[n, k, p, q] + \alpha \tilde{U}^{\text{НЧМ}}[n, k, p, q], \quad (12)$$

где α — скалярный коэффициент для выравнивания амплитуд режимов.

Данный подход является наиболее прямым решением задачи, так как происходит когерентное суммирование сигналов, при этом результирующее отношение сигнал/шум вырастет на 3 дБ по отношению к ФКМ и НЧМ пачкам.

Однако, данный подход очень чувствителен к точному расчету компенсирующих фазовых значений и согласованию индексов положений откликов, а ошибки в расчете фазы или индекса отклика могут привести к неработоспособности способа.

Способ 2. Оптимальное взвешенное суммирование (ОВС).

Данный способ является модификацией ФКС, а именно: помимо фазовой компенсации вводится операция определения дисперсии шумов $\sigma_{\text{ФКМ}}^2[n, k, p, q]$ и $\sigma_{\text{НЧМ}}^2[n, k, p, q]$ соответственно (как правило, достаточно взять локальную оценку по фоновым ячейкам или по областям, где заведомо отсутствуют цели).

Тогда, суммирование осуществляется с использованием весовых коэффициентов:

$$U^{\text{АМО}}[n, k, p, q] = w^{\text{ФКМ}}U^{\text{ФКМ}}[n, k, p, q] + w^{\text{НЧМ}}\tilde{U}^{\text{НЧМ}}[n, k, p, q], \quad (13)$$

где весовые коэффициенты определяются обратно пропорционально дисперсии шума:

$$w^{\text{ФКМ}}[n, k, p, q] \propto \frac{1}{\sigma_{\text{ФКМ}}^2[n, k, p, q]}, w^{\text{НЧМ}}[n, k, p, q] \propto \frac{1}{\sigma_{\text{НЧМ}}^2[n, k, p, q]} \quad (14)$$

Также в случае необходимости, можно ввести нормировку коэффициентов исходя из условия $w^{\text{ФКМ}} + w^{\text{НЧМ}} = 1$.

Данный способ обеспечивает учет гауссовского шума и полезен тем, что локальные шумовые всплески и неоднородности (например, неоднородность скорости в НЧМ режиме) будут вносить меньший вклад в объединенный сигнал.

Способ 3. Использование обобщенного критерия максимального правдоподобия (GLRT).

Данный способ строится на базе обобщенного критерия максимального правдоподобия (от англ. «*Generalized Likelihood Ratio Test*», *GLRT*), и используется в задачах обнаружения сигналов при наличии шума. В случаях, когда приведение фазы многомерных массивов ФКМ и НЧМ режимов затруднительно или не обладает требуемой стабильностью, можно сформировать совместную функцию правдоподобия, которая использует только модуль полученных значений. Тогда полученное в итоге распределение целей в вещественном виде T можно получить следующим образом:

$$T^{\text{АМО}}[n, k, p, q] = \frac{|U^{\text{ФКМ}}[n, k, p, q]|^2}{\sigma_{\text{ФКМ}}^2[n, k, p, q]} + \frac{|U^{\text{НЧМ}}[n, k, p, q]|^2}{\sigma_{\text{НЧМ}}^2[n, k, p, q]}. \quad (15)$$

Данный способ не требует фазовой компенсации и обладает хорошей робастностью, однако, так как происходит сложение мощностей, то энергетический выигрыш в таком случае будет меньше, чем для ФКС и ОВС. Также в данном способе на выход поступают уже вещественные отклики $T^{\text{АМО}}$, что делает невозможным дальнейшую фазовую обработку сигналов.

Способ 4. Проекционное объединение.

Для того чтобы устранить паразитные отклики НЧМ режима и при этом сохранить энергетическую прибавку от ФКМ режима предлагается использовать проекционное объединение, где $U^{\text{ФКМ}}$ используется как опорное пространство, а $U^{\text{НЧМ}}$ проецируется на него. Фазовая компенсация $U^{\text{НЧМ}}$ при этом является желательной, но не обязательной операцией.

Чтобы проекция была более устойчивой, вводят область Ω вокруг каждой ячейки $[n, k, p, q]$ и формируют векторы:

$$\mathbf{x}_{\text{ФКМ}} = \text{vec}\{U^{\text{ФКМ}}(\Omega)\}, \mathbf{x}_{\text{НЧМ}} = \text{vec}\{U^{\text{НЧМ}}(\Omega)\}, \quad (16)$$

где $\text{vec}(\cdot)$ — функция получения векторов в области аргумента.

Тогда запишем проекцию следующим образом:

$$\hat{\mathbf{g}} = \frac{\mathbf{x}_{\text{ФКМ}}}{\|\mathbf{x}_{\text{ФКМ}}\|}, a = \hat{\mathbf{g}}^H \mathbf{x}_{\text{НЧМ}}, \mathbf{x}_{\text{ПР}} = a, \quad (17)$$

$$\mathbf{x}_{\text{АМО}} = \mathbf{x}_{\text{ФКМ}} + a\mathbf{x}_{\text{ПР}}.$$

Стоит отметить, что данный способ потенциально устойчив к фазовой нестабильности, но требует большего количества вычислений из-за расширения области вычислений ввиду расширения областей вычислений на Ω .

Прирост отношения сигнал/шум в данном способе будет зависеть от нормированного коэффициента корреляции в анализируемых областях, в общем случае он изменяется в диапазоне $\rho \in [0, 1]$ и может быть определен:

$$\rho = \frac{|\mathbf{x}_{\text{ФКМ}}^H \mathbf{x}_{\text{НЧМ}}|}{\|\mathbf{x}_{\text{ФКМ}}\| \|\mathbf{x}_{\text{НЧМ}}\|}. \quad (18)$$

Тогда полезная энергия от НЧМ режима будет пропорциональна ρ^2 . По результатам сравнительного анализа можно сделать вывод, что способ *GLRT* является оптимальным и рекомендуется к дальнейшей проработке.

4. Моделирование АМО

Для проверки работоспособности АМО было проведено математическое моделирование его работы. Составлена математическая модель *ММО* РЛС с АМО с параметрами, представленными в таблице 1. Моделирование проводилось для наличия 3 целей с параметрами: $R_1 = 400$ м, $R_2 = 800$ м, $R_3 = 1300$ м, $V_1 = 0$ м/с, $V_2 = 2$ м/с, $V_3 = -5$ м/с, $\sigma_1 = 100$ кв. м, $\sigma_2 = 1$ кв. м, $\sigma_3 = 0.001$ кв. м. Результаты моделирования представлены в виде трехмерных распределений откликов для НЧМ (рис. 1), ФКМ (рис. 2), маски подтверждения (рис. 3) и ОВС (рис. 4).

Как видно из представленных данных моделирования, до применения АМО в режиме НЧМ (рис. 1) наблюдается по 8 откликов для каждой цели, равномерно распределенных по сечению радиальной скорости, что демонстрирует упомянутый ранее эффект появления неоднозначностей из-за фазовых искажений, свойственных данному режиму. При этом все отклики имеют ширину по уровню половинной мощности 0,68 м в сечении по дальности и 0,43 м/с в сечении по радиальной скорости. В ФКМ режиме (рис. 2.) наблюдается значительно худшая, в сравнении с НЧМ режимом, разрешающая способность по дальности (51 м.). Применение простой маски подтверждения (рис. 3) восстанавливает только самую большую по амплитуде цель. Применение же АМО позволило успешно детектировать

Таблица 1. Конфигурация МИМО РЛС

Table 1. MIMO Radar Configuration

Параметр	Значение
Центральная частота РЛС (f_c)	24,15 ГГц
Частота дискретизации АЦП (f_d)	10 МГц
Полоса частот ВЧ РЛС ($\Delta f_{ВЧ}$)	200 МГц
Длительность одной пачки импульсов (зондирующего цикла для одного типа модуляции) ($\tau_{цикл}$)	12,8 мс
Длительность одного импульса (чирпа/рампы/кодовой последовательности) ($\tau_{имп}$)	0,2 мс
Количество импульсов (чирпов/рамп/кодовых последовательностей в одном цикле зондирования) ($N_{имп}$)	64
Длина кодовой последовательности ($N_{симв.фкм}$)	511
Количество приемных каналов РЛС ($N_{прм}$)	8
Количество передающих каналов РЛС ($N_{прд}$)	8
Количество отсчетов данных/БПФ в области частоты/скорости (N_D)	512
Количество отсчетов данных/БПФ в области дальности/времени (N_R)	512

все 3 цели с предельными для выбранных сигнально-кодовых конструкций параметрами разрешающей способности по дальности (ширины откликов по уровню половинной мощности не превышают 0,8 м.), радиальной скорости (ширины откликов по уровню половинной мощности не превышают 0,5 м/с), а также полный диапазон однозначно определяемых радиальных скоростей (± 15 м/с для рассматриваемого случая).

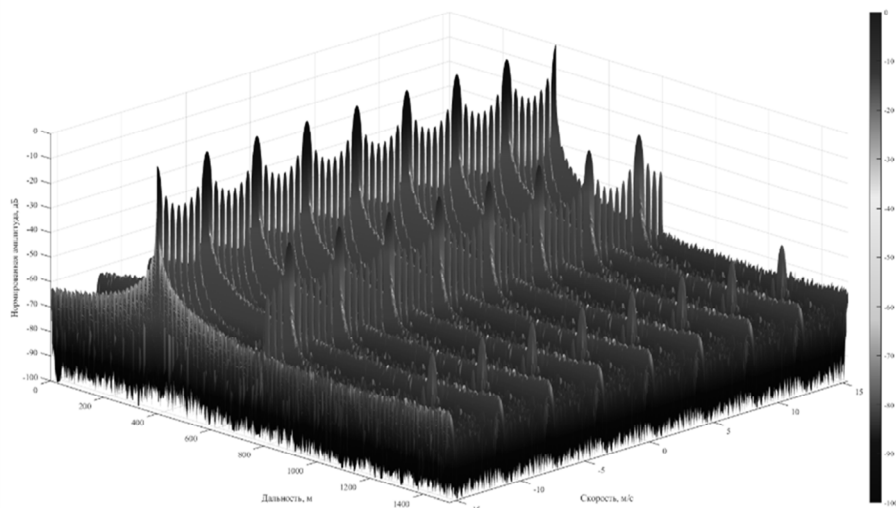


Рис. 1. НЧМ режим, 3 цели.

Fig. 1. CFM mode, 3 targets

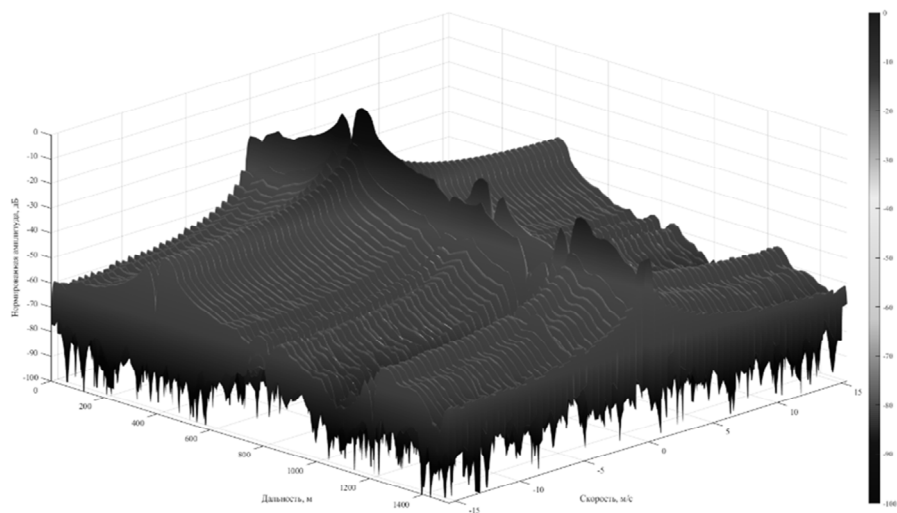


Рис. 2. ФКМ режим, 3 цели.

Fig. 2. PSK mode, 3 targets

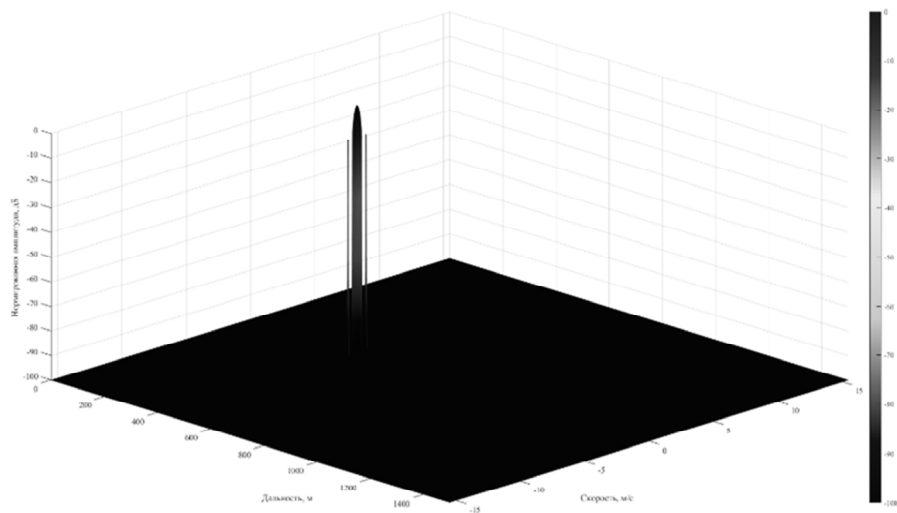


Рис. 3. Совместная обработка с маской подтверждения, 3 цели.

Fig. 3. Co-processing with confirmation mask, 3 targets

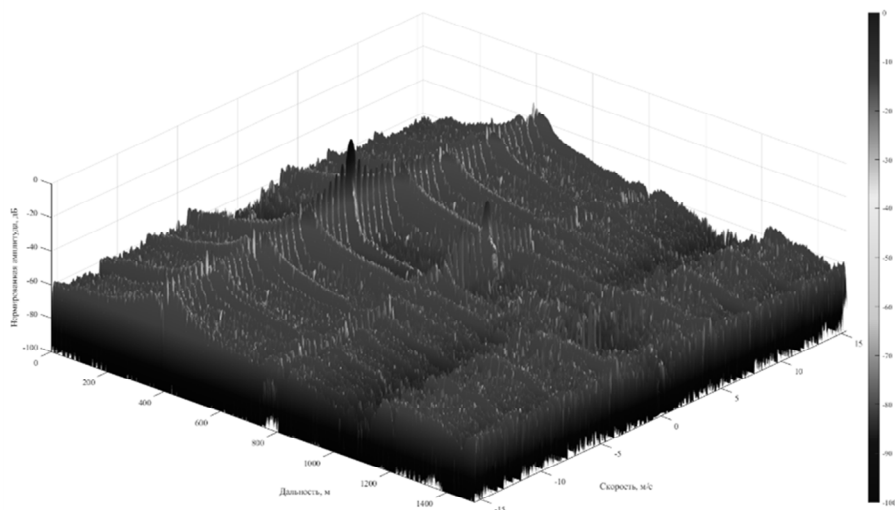


Рис. 4. Применение АМО с ОВС, 3 цели.

Fig. 4. AMO mode with OVS, 3 targets

5. Заключение

В работе изучены существующие подходы в области устранения неоднозначности определения радиальной скорости, которые могут применяться в *MIMO* радиолокаторах с частотной модуляцией, проведен анализ преимуществ и недостатков существующих подходов, по результатам которого сформулированы их ограничения.

Предложен и исследован алгоритм междоуплиционной обработки, построенный на основе совместной обработки двух режимов разделения каналов: фазокодовой манипуляции и непрерывной частотной модуляции с медленной фазокодовой манипуляцией. Показано, что применение данного алгоритма позволило детектировать цели с предельными для выбранных сигнально-кодовых конструкций параметрами разрешающей способности по дальности, радиальной скорости, а также полный диапазон однозначно определяемых радиальных скоростей.

Список литературы

1. Мелёшин Ю. М., Хасанов М. С., Карпов В. Н., Лялин К. С. ММО радиолокатор на базе линейно-частотно модулированных сигналов с медленной фазокодовой манипуляцией // Труды МАИ. 2024. № 138. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=182670>.

2. Мелёшин Ю. М. Алгоритм динамической обработки радиолокационных сигналов на базе частичной корреляции модулирующих последовательностей // Труды МАИ. 2025. № 145. URL: <https://trudymai.ru/publications.php?ID=186891>.
3. Kronauge M., Schroeder C., Rohling H. Radar target detection and Doppler ambiguity resolution. In : Proceedings of the 11th International Radar Symposium (IRS). Vilnius, Lithuania, 2010. P. 1–4.
4. Gonzalez H. A. et al. Doppler disambiguation in MIMO FMCW radars with binary phase modulation // IET Radar, Sonar & Navigation. 2021. Vol. 15, No. 8. P. 884–901.
5. Zhang J., Zhang Z., Li Y., Gu C., Mao J. Real-Time Human Motion Tracking Technique Based On a 77 GHz FMCW MIMO Radar System. In : 2024 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Beijing, China, 2024. P. 1–3.
6. Chan L. Y., Genschow D., Schwarz U. T. Combining delta-phi velocity measurement and DBSCAN clustering to localize slowly moving objects in short ranges with limited slow-time radar data. In : 2023 24th International Radar Symposium (IRS). Berlin, Germany, 2023.
7. Zhang R., Cao S. Robust and Adaptive Radar Elliptical Density-Based Spatial Clustering and labeling for mmWave Radar Point Cloud Data. In : 2019 53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. Pacific Grove, CA, USA, 2019. P. 919–924.
8. Liu X., Tan K., Wang X., Yang G.-M., Zheng L. A Fast Synthetic-Frame Method for MIMO Radar Global Imaging. In : 2024 Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference (CSRSWTC). Macao, China, 2024. P. 1–3.
9. Srihari P., G. S. V., Kumar U., Nandagiri A., Pardhasaradhi B., Cenkeramaddi L. R. FMCW Radar-Based Detection and Tracking of Drones Using DBSCAN Clustering and Extended Kalman Filter for Anti-Drone Defense Systems. In : 2024 IEEE 21st India Council International Conference (INDICON). Kharagpur, India, 2024. P. 1–6.
10. Pirkani A., Stove A. G., Kumar D., Cherniakov M., Gashinova M. S. 77 GHz FMCW Imaging Radar for Low Observable and Small Marine Target Detection in Dynamic Sea Conditions Based on Combined MIMO and DBS. In : IEEE Transactions on Radar Systems. 2024. Vol. 2. P. 517–534.
11. Liu C., Gonzalez H. A., Vogginger B., Mayr C. G. Phase-based Doppler Disambiguation in TDM and BPM MIMO FMCW Radars. In : 2021 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS). San Diego, CA, USA, 2021. P. 87–90.
12. Yang B., Liu S., Zhang H., Zhou Y. A Velocity Ambiguity Resolution Algorithm Based on Improved Hypothetical Phase Compensation for TDM-MIMO Radar Traffic Target Imaging // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2024. Vol. 17. P. 3409–3424.
13. Gonzalez H. A., Liu C., Vogginger B., Mayr C. G. Doppler Ambiguity Resolution for Binary-Phase-Modulated MIMO FMCW Radars. In : 2019 International Radar Conference (RADAR). Toulon, France, 2019. P. 1–6.

Информация об авторе

Мелёшин Юрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по образовательной деятельности Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ».

Intermodulation Signal Processing Algorithm in MIMO Radars

Yu. M. Meleshin

*National Research University of Electronic Technology (MIET)
Shokina Square, build. 1, Zelenograd, Moscow, 124498, Russian Federation
i@imym.ru*

Received: March 19, 2026

Peer-reviewed: March 26, 2026

Accepted: March 26, 2026

Abstract: *The paper addresses the issues of optimal design of signal-code structures in MIMO radars, taking into account suppression of parasitic components in the target velocity spectrum arising in MIMO radars with linear frequency modulation and slow phase-code modulation. Existing approaches to eliminating ambiguity in the estimated velocity are reviewed, and an intermodulation signal processing algorithm is proposed that resolves the ambiguity in the estimated velocity through joint processing of two signal-code structures with different channel separation methods: phase-coded and combined. It is shown that the use of this algorithm makes it possible to preserve the limiting performance of the MIMO radar in terms of range resolution and radial velocity resolution, while at the same time providing the full range of unambiguous radial velocity estimation.*

Keywords: *MIMO radar, radar, FMCW, BPSK, intermodulation processing, digital signal processing.*

For citation (IEEE): Yu. M. Meleshin, “Intermodulation Signal Processing Algorithm in MIMO Radars,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 3, pp. 434–450, 2026, doi: 10.21227/nb8e-kz56. (In Russ.).

References

1. Yu. M. Meleshin, M. S. Khasanov, V. N. Karpov, and K. S. Lyalin, “MIMO radar based on linear-frequency modulated signals with slow phase-code shift keying,” *Trudy MAI*, no. 138, 2024. [Online]. Available: <https://trudymai.ru/published.php?ID=182670>. (In Russ.).
2. Yu. M. Meleshin, “Algorithm for dynamic processing of radar signals based on partial correlation of modulating sequences,” *Trudy MAI*, no. 145, 2025. [Online]. Available: <https://trudymai.ru/publications.php?ID=186891>.
3. M. Kronauge, C. Schroeder, and H. Rohling, “Radar target detection and Doppler ambiguity resolution,” in *Proceedings of the 11th International Radar Symposium (IRS)*. Vilnius, Lithuania, pp. 1–4, 2010.
4. H. A. Gonzalez, et al., “Doppler disambiguation in MIMO FMCW radars with binary phase modulation,” *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 15, no. 8, pp. 884–901, 2021.

5. J. Zhang, et al., “Real-Time Human Motion Tracking Technique Based On a 77 GHz FMCW MIMO Radar System,” in *2024 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, Beijing, China, pp. 1–3, 2024.
6. L. Y. Chan, D. Genschow, and U. T. Schwarz, “Combining delta-phi velocity measurement and DBSCAN clustering to localize slowly moving objects in short ranges with limited slow-time radar data,” in *2023 24th International Radar Symposium (IRS)*, Berlin, Germany, 2023.
7. R. Zhang and S. Cao, “Robust and Adaptive Radar Elliptical Density-Based Spatial Clustering and labeling for mmWave Radar Point Cloud Data,” in *2019 53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, Pacific Grove, CA, USA, pp. 919–924, 2019.
8. X. Liu, et al., “A Fast Synthetic-Frame Method for MIMO Radar Global Imaging,” in: *2024 Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference (CSRSWTC)*, Macao, China, pp. 1–3, 2024.
9. P. Srihari, et al., “FMCW Radar-Based Detection and Tracking of Drones Using DBSCAN Clustering and Extended Kalman Filter for Anti-Drone Defense Systems,” in *2024 IEEE 21st India Council International Conference (INDICON)*, Kharagpur, India, pp. 1–6, 2024.
10. A. Pirkani, et al., “77 GHz FMCW Imaging Radar for Low Observable and Small Marine Target Detection in Dynamic Sea Conditions Based on Combined MIMO and DBS,” *IEEE Transactions on Radar Systems*, vol. 2, pp. 517–534, 2024.
11. C. Liu, et al., “Phase-based Doppler Disambiguation in TDM and BPM MIMO FMCW Radars,” in: *2021 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, San Diego, CA, USA, pp. 87–90, 2021.
12. B. Yang, et al., “A Velocity Ambiguity Resolution Algorithm Based on Improved Hypothetical Phase Compensation for TDM-MIMO Radar Traffic Target Imaging,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 17, pp. 3409–3424, 2024.
13. H. A. Gonzalez, et al., “Doppler Ambiguity Resolution for Binary-Phase-Modulated MIMO FMCW Radars,” in: *2019 International Radar Conference (RADAR)*, Toulon, France, pp. 1–6, 2019.

Information about the author

Yury M. Meleshin, Cand. Sci (Eng.), Associate Professor, Deputy Director for Educational Activities at the L. N. Presnukhin Institute of Microdevices and Control Systems, MIET.

Аппаратная реализация алгоритма со знакопеременным накоплением в ММО радиолокаторах

Мелёшин Ю. М., Лавриненко А. Д., Съедин Е. М., Безруков И. А.

НИУ «МИЭТ»

пл. Шокина, д. 1, г. Зеленоград, г. Москва, 124498, Российская Федерация

i@imyt.ru

Получено: 19 марта 2026 г.

Отрецензировано: 26 марта 2026 г.

Принято к публикации: 26 марта 2026 г.

Аннотация: Статья посвящена изучению вопросов аппаратной реализации алгоритма знакопеременного накопления импульсов в ММО радиолокаторах с непрерывной частотной модуляцией и медленной фазокодовой манипуляцией. Рассмотрены вопросы реализации представленного алгоритма с применением системы на кристалле, содержащей в едином корпусе процессорные ядра и программируемую логическую интегральную схему. Проведены экспериментальные исследования предложенных подходов с использованием ММО радиолокатора К-диапазона частот и продемонстрирована работоспособность предложенных подходов. По результатам сделаны выводы о целесообразности использования предлагаемых подходов в дальнейшем.

Ключевые слова: ММО радиолокатор, РЛС, аппаратная реализация, FMCW, BPSK, знакопеременное накопление.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Мелёшин Ю. М., Лавриненко А. Д., Съедин Е. М., Безруков И. А. Аппаратная реализация алгоритма со знакопеременным накоплением в ММО радиолокаторах // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2026. Т. 9, № 3. С. 451—462.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Мелёшин, Ю. М. Аппаратная реализация алгоритма со знакопеременным накоплением в ММО радиолокаторах / Ю. М. Мелёшин, А. Д. Лавриненко, Е. М. Съедин, И. А. Безруков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2026. — Т. 9, № 3. — С. 451—462.

1. Введение

В настоящее время актуальными являются исследования в области аппаратной реализации радиолокационных станций с множественным

входом и множественным выходом (от англ. «*multiple-input multiple-output*», далее — *MIMO* РЛС), в которых строится виртуальная антенная решетка за счет обеспечения взаимной ортогональности между сигналами, передаваемыми с передающих антенных каналов, а также независимой оцифровки всех сигналов, принятых приемными антенными каналами.

Секторные *MIMO* РЛС должны обеспечивать обнаружение целей в заданном секторе работы (по азимуту и углу места), так как первые *MIMO* РЛС были громоздкими и решали задачи обнаружения целей во всей верхней полусфере пространства [1], то в рамках данного раздела сосредоточимся на решении задач радиолокации для заданного (часто — не очень большого) сектора работы. Исторически эти задачи решались либо путем механического поворота антенной системы, либо электронным сканированием луча. Оба данных подхода и до сих пор находят широкое применение в радиолокации и успешно могут решать поставленные задачи. Секторные *MIMO* РЛС появились и начали активно развиваться как способ улучшения угловой разрешающей способности РЛС при ограниченных габаритах антенной апертуры или ограниченном количестве физических антенных каналов РЛС [2].

С точки зрения аппаратной реализации ключевое отличие секторных *MIMO* РЛС от более ранних *MIMO* РЛС — это необходимость одновременно удовлетворять функциональным требованиям в части сектора работы, разрешающей способности, уровня боковых лепестков и т. д., а также аппаратным (в том числе конструктивным) требованиям: распределение когерентных опорных сигналов (тактирование и гетеродинирование) по каналам, калибровка амплитудно-фазовых рассогласований каналов, уменьшение взаимовлияния передающих и приемных каналов, обеспечение теплового режима активных элементов, обеспечение требуемых потоков данных и т. д. Зачастую данные требования также учитывали требования к радиоэлектронике автомобильной промышленности, так как одним из ключевых направлений предполагаемого развития секторных *MIMO* РЛС стало развитие систем помощи водителю (*ADAS*) [3].

В результате современные подходы к аппаратной реализации свелись к нескольким классам архитектур, различающихся тем, где происходит формирование диаграммы направленности и разделение *MIMO* каналов (на высокой частоте, низкой частоте и полностью в цифровой части) и как организовано распределение опорных сигналов и калибровка. Внутри этих архитектур интенсивно развиваются модульные подходы масштабирования РЛС, в которых опорный сигнал гетеродина распределяется между каналами на кратно более низкой частоте, а в каждом модуле стоит свой умножитель частоты, который уже увеличивает частоту гетеродина до рабочих значений [4]. Также этот подход часто комбинируют с макси-

мальным использованием высокоинтегрированных систем на кристалле (*SoC*), когда максимальное число функциональных операций переносится на единый специализированный кристалл [5].

От способа, за счет которого обеспечивается взаимная ортогональность сигналов, также зависит аппаратная реализация *MIMO* РЛС. В работе [6] предложен способ, основанный на алгоритме знакопеременного накопления импульсов, которые модулированы непрерывной частотной линейной модуляцией, а начальная фаза каждого импульса изменяется в соответствии с ортогональными кодовыми последовательностями.

Таким образом, в данной работе рассмотрены вопросы реализации представленного алгоритма на базе *SoC*.

2. Анализ вычислительной сложности алгоритмов

Сравнение вычислительной сложности алгоритмов знакопеременного накопления (обозначим его как алгоритм №1) и классического алгоритма, основанного на выполнении знакопеременного БПФ по импульсам (обозначим его как алгоритм №2) произведем для параметров, указанных в таблице 1.

Таблица 1. Конфигурация *MIMO* РЛС.

Table 1. *MIMO* Radar Configuration

Параметр	Значение
Диапазон частот, ГГц	24,05—24,25
Количество элементов ПРД ($N_{\text{прд}}$)	32 (два столбца в угломестной плоскости)
Количество элементов ПРМ ($N_{\text{прм}}$)	16 (одна линия в азимутальной плоскости)
Межэлементный шаг ПРД (dx), мм	7,6
Межэлементный шаг ПРМ (dy), мм	6,2
Количество отсчетов на импульс ($N_{\text{отсч}}$)	4096
Количество импульсов (k)	32
Частота дискретизации АЦП, МГц	1
Длительность импульса, мс	4,096

Вычислительная сложность алгоритма № 1.

Для алгоритма № 1 отсчеты каждого приемного канала делятся на два интервала, копируются $N_{\text{прд}}$ раз, домножаются на знаки двоичных последовательностей и суммируются по всем k импульсам, после этого выполняется трехмерное БПФ. Соответственно, вычислительную сложность можно записать как:

$$\begin{aligned}
 C_1 \approx & 2kN_{\text{прд}}N_{\text{прм}}N_{\text{отсч}} \\
 & + 2(N_{\text{прм}}N_{\text{отсч}}N_{\text{прд}} \log_2 N_{\text{прд}} \\
 & + N_{\text{прд}}N_{\text{отсч}}N_{\text{прм}} \log_2 N_{\text{прм}} \\
 & + N_{\text{прд}}N_{\text{прм}}N_{\text{отсч}} \log_2 N_{\text{отсч}}),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где первое слагаемое соответствует операциям знакопеременного накопления, а второе — двум трехмерным БПФ для полученных массивов.

Тогда в общем виде можно записать порядок вычислительной сложности как:

$$C_1 = O(kN_{\text{прд}}N_{\text{прм}}N_{\text{отсч}} + N_{\text{прд}}N_{\text{прм}}N_{\text{отсч}} \log_2 N_{\text{отсч}}). \quad (2)$$

Вычислительная сложность алгоритма № 2.

Для алгоритма № 2 отсчеты также копируются $N_{\text{прд}}$ раз и домножаются на двоичную последовательность, однако не суммируются, а записываются в память, в результате чего формируется массив размерностью $N_{\text{прд}} \times N_{\text{прм}} \times N_{\text{отсч}} \times k$, после чего выполняется четырехмерное БПФ. Соответственно, вычислительную сложность можно записать как:

$$\begin{aligned} C_2 \approx kN_{\text{прд}}N_{\text{прм}}N_{\text{отсч}} &+ (kN_{\text{прм}}N_{\text{отсч}}N_{\text{прд}} \log_2 N_{\text{прд}} \\ &+ kN_{\text{прд}}N_{\text{отсч}}N_{\text{прм}} \log_2 N_{\text{прм}} \\ &+ kN_{\text{прд}}N_{\text{прм}}N_{\text{отсч}} \log_2 N_{\text{отсч}} + N_{\text{прд}}N_{\text{прм}}N_{\text{отсч}}k \log_2 k) \end{aligned} \quad (3)$$

В отличие от алгоритма № 1 здесь отсутствует операция накопления, однако появляется существенно более затратная обработка всего массива k раз. Также стоит отметить, что в данном случае задействован существенно больший объем памяти для хранения отсчетов данных.

В общем виде можно записать порядок вычислительной сложности как:

$$C_2 = O(kN_{\text{прд}}N_{\text{прм}}N_{\text{отсч}} \log_2 N_{\text{отсч}} + N_{\text{прд}}N_{\text{прм}}N_{\text{отсч}} k \log_2 k). \quad (4)$$

Сравнение результатов для фиксированного набора параметров.

Количество операций, выполняемых для фиксированного набора параметров, представленного в таблице 1, представлено в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение количества операций.

Table 2. Comparison of the number of operations

№ алгоритма	Операции смены знака/подготовки, млн. операций	Операции БПФ, млн. операций	Сумма, млн. операций
1	134	88.1	222.1
2	67	1744	1811

Как видно из представленных данных, алгоритм № 1 для представленных начальных условий обладает вычислительной сложностью в 8,15 раз ниже, чем алгоритм № 2.

3. Аппаратная реализация алгоритма знакопеременного накопления на системе на кристалле

В рамках исследований алгоритма знакопеременного накопления было необходимо оценить возможность и эффективность реализации данного алгоритма на системе на кристалле *AMD Zynq 7020*, который содержит встроенную ПЛИС с 85 000 логическими ячейками и 220 ячейками цифровой обработки сигналов, а также 2 процессорных ядра *Arm Cortex-A9 MPCore* с частотой работы до 1 ГГц. Данное аппаратное решение относится к самой распространенной линейке систем на кристалле от компании *AMD*, возможность реализации описанного ранее алгоритма на такой системе позволила бы говорить об эффективности разработанного алгоритма.

Общая структурная схема цифровой обработки сигналов представлена на рис. 1.

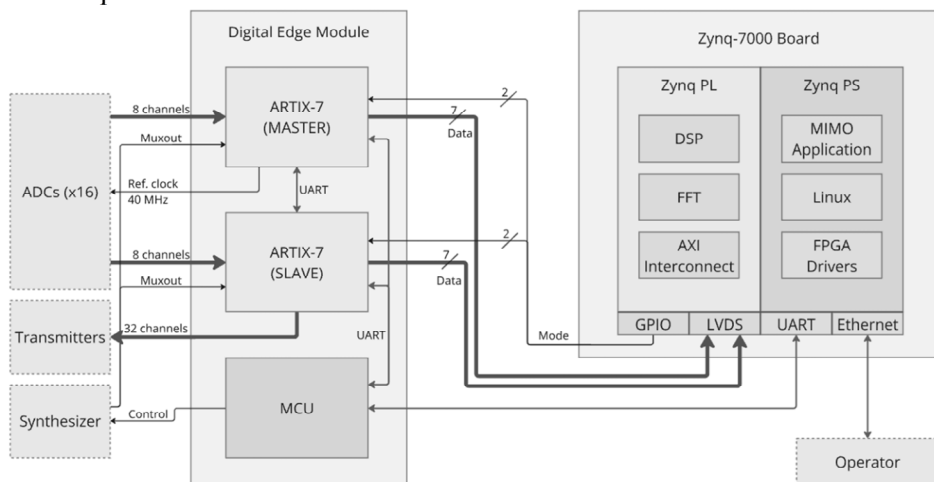


Рис. 1. Общая структурная схема ЦОС.

Fig. 1. General structural diagram of the DSP system

В операциях ЦОС участвует также цифровая плата сбора и передачи данных с АЦП, однако она не будет учитываться в данном подразделе, так как все операции непосредственно алгоритма выполняются на плате *Zynq 7020*. На рис. 2 показана общая структурная схема проекта ПЛИС системы на кристалле *Zynq 7020*.

Как видно из структуры, схема модуля ЦОС разбита на 4 параллельных потока. Каждый поток обрабатывает данные по 4 каналам АЦП (итого 16). Все 4 потока имеют схожую архитектуру. Отличаются только связкой *AXIS Switch* и модулем, изображенным справа от него. На каждом из этапов обработки задействуются разные соответствующие блоки.

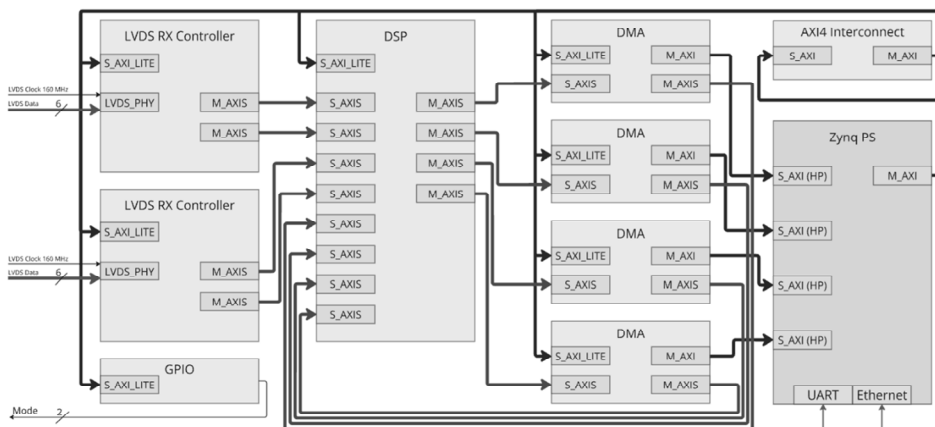


Рис. 2. Структурная схема проекта ПЛИС.

Fig. 2. Structural diagram of the FPGA project

Ключевую роль в данном проекте играет модуль ЦОС (*DSP*), его функциональная схема показана на рис. 3.

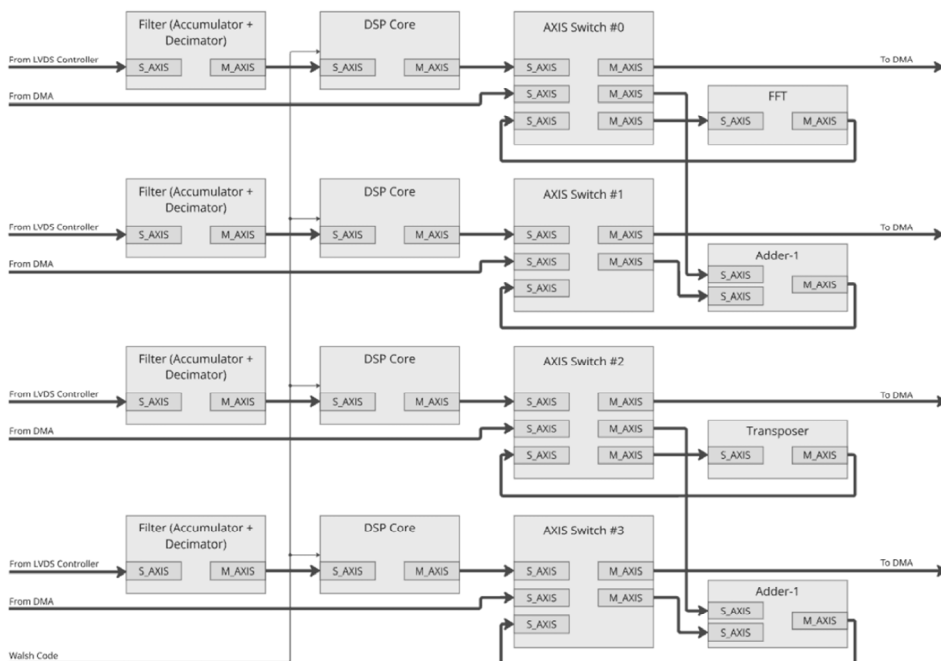


Рис. 3. Функциональная схема модуля ЦОС.

Fig. 3. Functional diagram of the DSP module

Описание функциональных блоков:

1) «*Filter (Accumulator + Decimator)*». Преобразует входной поток данных АЦП в поток с более низкой частотой дискретизации. Период дискретизации определяется параметром, задаваемым процессором по шине AXI4. При этом на выходе у отсчетов сигнала увеличена разрядность с 8 до 16. Это увеличение дает возможность накапливать сигнал в течение заданного периода дискретизации.

2) «*DSP Core*». Выполняет формирование матрицы сигналов во временной области размером $N_{\text{прд}} N_{\text{прм}} N_{\text{отсч}}$.

3) «*AXIS Switch*». Коммутатор потоков *AXI Stream*. Имеется возможность каждый S_AXIS порт соединить с каждым M_AXIS . Параметры коммутации разные на каждом из этапов обработки и задаются процессором по шине AXI4.

4) «*FFT*». Выполняет алгоритм БПФ. Блок сконфигурирован как четырехканальный. Имеет размер преобразования, равный 4096.

5) «*Adder*». Сумматор, выполняющий сумму отсчетов, поступающих на вход S_AXIS . Результат суммирования выставляется на порт M_AXIS .

6) «*Transposer*». Модуль, выполняющий транспонирование матрицы сигналов во временной области с целью привести данные в ОЗУ к формату, соответствующему входам 4-канального *FFT*. Реализован на базе двухпортовой памяти и специальной логики формирования адресов записи и чтения.

4. Экспериментальная отработка алгоритма

Экспериментальная отработка алгоритма проводилась на *MIMO* РЛС с параметрами, представленными в таблице 1. Для подтверждения работоспособности алгоритма были произведены измерения в безэховой камере для одиночной цели на расстоянии около 7 м. Внешний вид установки представлен на рис. 4. Результаты распределения сигнала отклика в плоскости Азимут — Угол места для фиксированного сечения, соответствующего положению цели после выполнения всех алгоритмов ЦОС, представлены на рис. 5.

Как видно по представленным данным, отклик от цели имеет ширину по уровню половинной мощности $3,2^\circ$ в азимутальной плоскости и $5,2^\circ$ в угломестной плоскости, что соответствует размеру полной 512-элементной виртуальной антенной решетки и подтверждает реализацию принципа *MIMO* РЛС и успешность выполнения операций ЦОС.

Реализация представленного алгоритма с использованием отладочной платы *AMD Zynq 7020* позволила запустить предложенный способ на физической аппаратуре и провести экспериментальную отладку и исследо-



Рис. 4. Экспериментальная установка.

Fig. 4. Experimental stand

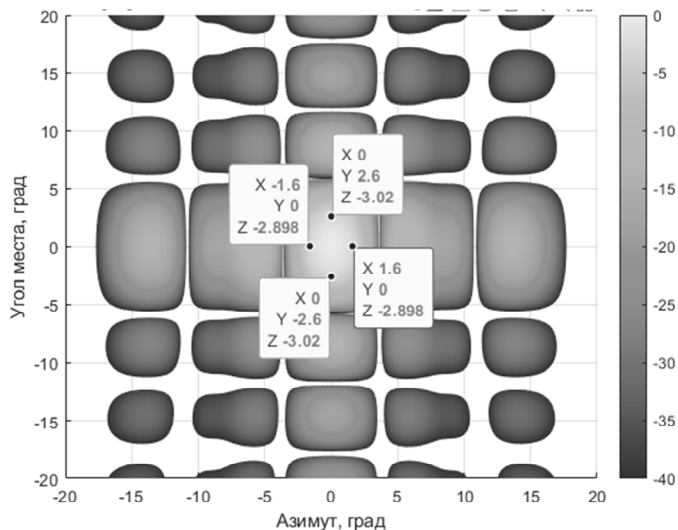


Рис. 5. Распределение сигнала отклика в плоскости «азимут — угол места».

Fig. 5. Distribution of the response signal in the azimuth-elevation plane

вания предлагаемого способа. Проверка проводилась для суммарного времени излучения 131 мс, а по результатам выполнения операций было по-

лучено время выполнения алгоритма 272 мс. Полученные значения свидетельствуют о сопоставимости времени выполнения алгоритма и времени излучения, что говорит о принципиальной возможности использования данного аппаратного решения. В случае необходимости сокращения времени выполнения алгоритма можно выбрать более производительную старшую модель в линейке *SoC AMD Zynq 7000*.

5. Заключение

Рассмотрены аспекты аппаратной реализации алгоритма знакопеременного накопления в *MIMO* РЛС с непрерывной частотной модуляцией и медленной фазокодовой манипуляцией. По результатам исследований было продемонстрировано, что вычислительная сложность такого алгоритма в 8,15 раз ниже, чем у классического алгоритма, основанного на БПФ по импульсам.

В ходе исследований возможной аппаратной реализации показано, что представленный алгоритм может быть реализован с использованием современных систем на кристалле серии *AMD Zynq 7000* в качестве основного вычислителя, а также приведены результаты экспериментальной обработки *MIMO* радиолокатора на базе данной системы на кристалле. В результате экспериментальной обработки было показано, что ширина отклика по уровню половинной мощности от одиночной цели составила $3,2^\circ$ в азимутальной плоскости и $5,2^\circ$ в угломестной плоскости, что соответствует размеру полной 512-элементной виртуальной антенной решетки и подтверждает реализацию принципа *MIMO* РЛС и успешность выполнения операций ЦОС.

Список литературы

1. Чапурский В. В., Слукин Г. П., Нониашвили М. И. и др. Прикладные задачи теории *MIMO* систем радиолокации и радиологграфии. М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024. 276 с.
2. Fishler E. et al. *MIMO* radar : an idea whose time has come. In : Proceedings of the 2004 IEEE Radar Conference. Philadelphia, PA, USA, 2004. P. 71–78.
3. Waldschmidt C., Hasch J., Menzel W. Automotive Radar – From First Efforts to Future Systems // IEEE Journal of Microwaves. 2021. Vol. 1, no. 1. P. 135–148.
4. Bott J. et al. An 8×8 *MIMO* Radar System Utilizing Cascadable Transceiver MMICs with On-Chip Antennas at 240 GHz // IEEE Transactions on Radar Systems. 2024. Vol. 2. P. 805–820.
5. Ng H. J., Hasan R., Kissinger D. A Scalable Four-Channel Frequency-Division Multiplexing *MIMO* Radar Utilizing Single-Sideband Delta-Sigma Modulation // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2019. Vol. 67, no. 11. P. 4578–4590.
6. Мелёшин Ю. М., Хасанов М. С., Карпов В. Н., Лялин К. С. *MIMO* радиолокатор на базе линейно-частотно модулированных сигналов с медленной фазокодовой манипуляцией // Труды МАИ. 2024. № 138.

Информация об авторах

Мелёшин Юрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по образовательной деятельности Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ».

Лавриненко Александр Дмитриевич, инженер-электроник Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ».

Съедин Евгений Михайлович, студент 1 курса магистратуры Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ».

Безруков Илья Андреевич, студент 1 курса магистратуры Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ».

Hardware Implementation of an Alternating-Sign Accumulation Algorithm in MIMO Radars

Y. M. Meleshin, A. D. Lavrinenko, E. M. Syedin, and I. A. Bezrukov

*National Research University of Electronic Technology (MIET)
Shokina Square, Build. 1, Zelenograd, Moscow, 124498, Russian Federation
i@imym.ru*

Received: March 19, 2026

Peer-reviewed: March 26, 2026

Accepted: March 26, 2026

Abstract: *The article is devoted to the study of hardware implementation aspects of an alternating-sign pulse accumulation algorithm in MIMO radars with continuous frequency modulation and slow phase-code modulation. The issues of implementing the proposed algorithm using a system-on-chip integrating processor cores and a programmable logic device within a single package are considered. Experimental studies of the proposed approaches were carried out using a K-band MIMO radar, and their operability was demonstrated. Based on the results obtained, conclusions were drawn regarding the feasibility of further use of the proposed approaches.*

Keywords: *MIMO radar, radar, hardware implementation, FMCW, BPSK, alternating-sign accumulation.*

For citation (IEEE): Y. M. Meleshin, A. D. Lavrinenko, E. M. Syedin and I. A. Bezrukov, "Hardware Implementation of an Alternating-Sign Accumulation Algorithm in MIMO Radars," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 3, pp. 451–462, 2026, doi: 10.21227/r3e0-yz08. (In Russ.).

References

1. V. V. Chapurskii, et al., *Applied problems of the theory of MIMO radar and radioholography systems*, Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publishing House, 2024. (In Russ.).
2. E. Fishler, et al., "MIMO radar: an idea whose time has come," in *Proceedings of the 2004 IEEE Radar Conference*, Philadelphia, PA, USA, pp. 71–78, 2004.
3. C. Waldschmidt, J. Hasch, and W. Menzel, "Automotive Radar – From First Efforts to Future Systems," *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 1, no. 1, pp. 135–148, 2021.
4. J. Bott, et al., "An 8×8 MIMO Radar System Utilizing Cascadable Transceiver MMICs With On-Chip Antennas at 240 GHz," *IEEE Transactions on Radar Systems*, vol. 2, pp. 805–820, 2024.
5. H. J. Ng, R. Hasan, and D. Kissinger, "A Scalable Four-Channel Frequency-Division Multiplexing MIMO Radar Utilizing Single-Sideband Delta-Sigma Modulation," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 11, pp. 4578–4590, 2019.
6. Yu. M. Meleshin, M. S. Khasanov, V. N. Karpov, and K. S. Lyalin, "MIMO radar based on linear-frequency modulated signals with slow phase-code shift keying," *Trudy MAI*, no. 138, 2024. (In Russ.).

Information about the authors

Yury M. Meleshin, Cand. Sci (Eng.), Associate Professor, Deputy Director for Educational Activities at the L. N. Presnukhin Institute of Microdevices and Control Systems, MIET.

Alexander D. Lavrinenko, Engineer at the L. N. Presnukhin Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (MIET).

Evgeniy M. Syedin, Master's Student at the L. N. Presnukhin Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (MIET).

Ilya A. Bezrukov, Master's Student at the L. N. Presnukhin Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (MIET).

УДК 621.396.049

Комплексный подход к повышению скорости передачи данных в современных беспроводных и спутниковых системах связи

Мордвинова А. Ю., Широков И. Б.

Севастопольский государственный университет

ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053., Российская Федерация

aumordvinova@sevsu.ru, shirokov@ieee.org

Получено: 20 марта 2026 г.

Отрецензировано: 26 марта 2026 г.

Принято к публикации: 26 марта 2026 г.

Аннотация: Резкий рост трафика в мобильных и фиксированных сетях связи, а также появление крупных спутниковых группировок типа Starlink делают задачу повышения скорости передачи данных одной из ключевых для отрасли. Простого «увеличения мощности передатчика» или расширения полосы частот уже недостаточно: спектр ограничен, а требования к качеству обслуживания продолжают расти. В работе рассматривается комплексный подход к росту пользовательских скоростей в современных системах связи. Показано, как сочетаются друг с другом методы пространственно-частотного уплотнения (OFDM/OFDMA, агрегация несущих, MIMO и Massive MIMO, формирование луча), адаптивные алгоритмы на уровне модуляции и кодирования, а также протокольные и архитектурные решения (оптимизация транспортных протоколов, снижение накладных расходов, использование эширования и edge-инфраструктуры). На примерах сетей LTE/5G, стандартов Wi-Fi нового поколения и низкоорбитальных спутниковых систем обсуждается, какие именно технические решения дают основной вклад в рост фактической скорости, наблюдаемой пользователем. Отдельно подчеркивается, что дальнейшее развитие высокоскоростных систем связи неизбежно связано с усложнением архитектуры и повышением требований к управлению ресурсами и безопасности.

Ключевые слова: скорость передачи данных, беспроводные и спутниковые системы связи, OFDM/OFDMA, агрегация несущих, MIMO и Massive MIMO, формирование луча.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Мордвинова А. Ю., Широков И. Б. Комплексный подход к повышению скорости передачи данных в современных беспроводных и спутниковых системах связи // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2026. Т. 9, № 3. С. 463—475.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Мордвинова, А. Ю. Комплексный подход к повышению скорости передачи данных в современных беспроводных и спутниковых системах связи / А. Ю. Мордвинова, И. Б. Широков // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2026. — Т. 9, № 3. — С. 463—475.

1. Введение

Рост объемов передаваемого трафика в сетях связи связан не только с классическим веб-доступом, но прежде всего с потоковым видео, облачными сервисами, онлайн-играми и массовым применением «умных» устройств. Это ведет к росту требований не столько к самому факту наличия подключения, сколько к устойчивой работе канала с высокой скоростью и малой задержкой.

С теоретической точки зрения скорость передачи в канале с шумом ограничена сверху формулой Шеннона и определяется полосой частот и отношением сигнал/шум. На практике простое увеличение мощности или расширение полосы быстро упирается в регуляторные ограничения, взаимные помехи и неоднородность реального канала, особенно в условиях плотной городской застройки. Дополнительные сложности создают современные спутниковые системы широкополосного доступа (в том числе низкоорбитальные группировки типа *Starlink*), где требуется обеспечить сопоставимые с наземными сетями скорости по каналу «земля — спутник — земля» при жестких ограничениях по спектру и энергетике [2].

В этих условиях задача повышения скорости передачи данных решается комплексно, на нескольких уровнях одновременно. Используются методы пространственно-частотного уплотнения (*OFDM/OFDMA*, агрегация несущих, *MIMO* и *Massive MIMO*), адаптивная модуляция и кодирование, а также протокольные и архитектурные решения, уменьшающие накладные расходы и сокращающие путь данных до пользователя. Цель данной работы — показать, как сочетание указанных подходов позволяет приближаться к теоретическим пределам пропускной способности в реальных наземных и спутниковых системах связи.

2. Особенности современных каналов связи и ограничения по скорости

2.1. Наземные сотовые и *Wi-Fi* сети

Для наземных систем связи типичной является городская среда с плотной застройкой, большим количеством отражающих поверхностей и источников помех. Радиосигнал, проходя от передатчика к приемнику,

многократно отражается от зданий, конструкций и внутренних перегородок, образуя множество путей распространения. В результате на антенну приемника приходят несколько копий одного и того же сигнала с разными задержками и фазами. Это явление называется многолучевостью и приводит к замираниям, интерференции и частотной избирательности канала [3].

Дополнительным фактором является ограниченность радиочастотного спектра. Операторы сотовой связи и производители *Wi-Fi*-оборудования вынуждены работать в строго регламентированных полосах, причем эти полосы часто разделяются между несколькими системами. Простое расширение полосы «вправо и влево» оказывается невозможным: соседние диапазоны заняты другими службами, а в нелицензируемых полосах (например, 2,4 и 5 ГГц для *Wi-Fi*) плотность устройств настолько высока, что любое увеличение занятой полосы приводит к усилению взаимных помех. Поэтому для наземных сетей ключевой задачей становится не столько увеличение самой полосы, сколько более плотное и аккуратное ее использование: многократное повторное использование частот в соседних сотах, точная настройка мощностей, использование направленных антенн и продвинутых методов цифровой обработки сигнала.

2.2. Спутниковые каналы (на примере *Starlink* и *LEO*-систем)

В спутниковых системах, таких как низкоорбитальные группировки, характер канала принципиально иной. Связь осуществляется по схеме «земля — спутник — земля», а расстояние до аппарата составляет сотни километров. С одной стороны, это уменьшает влияние городской застройки и локальных препятствий: основная часть трассы проходит в свободном пространстве. С другой стороны, появляется жесткое ограничение по энергетическому бюджету линии и по доступному частотному ресурсу: мощность передатчиков на борту спутника и у абонентских терминалов ограничена, а спектр в используемых диапазонах фиксирован и должен делиться между большим количеством лучей и пользователей [4].

Еще одна особенность низкоорбитальных систем — динамическая смена спутников и лучей. Абонентский терминал в течение короткого времени переходит из зоны обслуживания одного аппарата в зону другого, при этом необходимо поддерживать непрерывность соединения и достаточно высокую скорость. Это требует сложных алгоритмов управления ресурсами: распределения полосы и мощности между пользователями, планирования частот в соседних лучах, выбора маршрутов трафика внутри самой группировки. На стороне пользователя дополнительно ощущается фактор задержки: несмотря на то, что у *LEO*-систем она ниже, чем у гео-

стационарных спутников, путь сигнала все равно длиннее, чем в наземной сети, а значит, совокупная задержка и вариации задержки (*jitter*) становятся важным ограничением для части приложений.

2.3. Связь с теорией

С теоретической точки зрения как наземные, так и спутниковые каналы подчиняются общему ограничению: при заданной полосе B и отношении сигнал/шум S/N верхний предел пропускной способности задается формулой Шеннона [6]

$$C = B \cdot \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right).$$

Реальная система всегда работает ниже этого предела: часть ресурсов уходит на служебные заголовки и повторные передачи, часть — на обеспечение устойчивости связи в неблагоприятных условиях. Для наземных сетей основными «узкими местами» становятся дефицит спектра, интерференция и сильная многолучевость городского канала, фактически ограничивающие допустимое B и эффективное отношение S/N . Для спутниковых систем — ограниченная мощность, жесткие частотные рамки и необходимость делить ресурсы между большим числом абонентов, что также отражается на доступной полосе и энергетике линии. Обобщенное сравнение ключевых характеристик наземных и спутниковых каналов, влияющих на параметры B и S/N в формуле Шеннона, приведено в табл. 1 [5].

Таблица 1. Сравнение наземных и спутниковых каналов связи.

Table 1. Comparison of terrestrial and satellite communication channels

Характеристика	Наземные сотовые и <i>Wi-Fi</i> сети	Спутниковые <i>LEO</i> -системы (например, <i>Starlink</i>)
Тип среды	Городская среда, плотная застройка, помещения	Канал «земля — спутник — земля», большая высота орбиты
Дальность	От десятков метров (<i>Wi-Fi</i>) до нескольких километров (<i>LTE/5G</i> в городе)	Сотни-тысячи километров, связь через низкоорбитальные аппараты
Основные ограничения	Ограниченный спектр, сильная многолучевость, замирания, взаимные помехи базовых станций	Ограниченный частотный ресурс, энергетический бюджет линии, динамическая смена спутников и лучей
Повторное использование частот	Активное частотное планирование и плотное повторное использование в соседних сотах	Повторное использование частот через разнесенные лучи и разные орбиты, жесткое планирование

Характеристика	Наземные сотовые и <i>Wi-Fi</i> сети	Спутниковые <i>LEO</i> -системы (например, <i>Starlink</i>)
Типичные помехи	Интерференция от соседних ячеек и устройств, отражения от зданий и внутри помещений	Фоновые космические помехи, интерференция между спутниками/лучами, наземные источники шума
Задержка	Миллисекунды-десятки миллисекунд в пределах сети оператора	Десятки миллисекунд и выше из-за расстояния до спутника и маршрутизации через группировку
Управление ресурсами	Динамическое распределение частот и временных слотов между абонентами, <i>handover</i> между сотами	Назначение лучей и полос для подвижных абонентов, управление доступом к общему ресурсу группировки

3. Пространственно-частотные методы увеличения скорости

Современные системы связи увеличивают скорость передачи данных не только за счет роста мощности передатчиков, но в первую очередь за счет более плотного использования полосы частот и пространства. Если в формуле Шеннона фиксированы физические ограничения по S/N , то остается два пути: эффективнее использовать полосу B и добавлять «виртуальные» каналы за счет пространственного мультиплексирования.

3.1. OFDM, OFDMA и агрегация несущих

Идея ортогонального частотного разделения (*OFDM*) состоит в том, чтобы исходный широкий канал разбить на набор узких поднесущих. Если полоса B делится на K ортогональных подканалов шириной B_k , то при аддитивном шуме суммарная теоретическая пропускная способность может быть записана как

$$C_{OFDM} = \sum_{k=1}^K B_k \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S_k}{N_k} \right),$$

где S_k/N_k — отношение сигнал/шум на k -й поднесущей. Преимущество такого подхода в том, что система может индивидуально подстраивать мощность и модуляцию на каждой поднесущей, «отдавая» больше ресурса тем частям спектра, где канал лучше [7].

В многоабонентских системах используется *OFDMA*, когда разные поднесущие или их группы распределяются между абонентами. Для конкретного пользователя эффективная полоса $B_{\text{польз}}$ определяется количеством выделенных ему поднесущих, и его пропускная способность оценивается как

$$C_{\text{польз}} \approx \sum_{k \in K_{\text{польз}}} B_k \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S_k}{N_k} \right).$$

Практически это реализуется через агрегацию несущих в *LTE-Advanced/5G* и *channel bonding* в *Wi-Fi*: пользователю одновременно выделяется несколько соседних или разнесенных по частоте полос. Если каждая несущая имеет полосу B_0 , а абоненту агрегировано N_c несущих, то при близких условиях по *SNR* можно грубо оценить

$$C_{\text{агр}} \approx N_c \cdot B_0 \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right),$$

то есть пропускная способность растет почти пропорционально числу объединенных полос, пока не начинают проявляться ограничения по мощности и помехам [8].

3.2. MIMO, Massive MIMO и формирование луча

Вторая ключевая идея — использовать не только частоту, но и пространство. В многоантенных системах *MIMO* при наличии нескольких передающих и приемных антенн канал описывается матрицей H . Теоретическая пропускная способность при пространственном мультиплексировании может быть записана в виде

$$C_{\text{MIMO}} = B \cdot \log_2 \det \left(I + \frac{\rho}{N_t} H H^H \right),$$

где ρ — среднее отношение сигнал/шум, N_t — число передающих антенн, I — единичная матрица. В идеализированном случае независимых каналов и одинакового *SNR* этот результат часто упрощают до оценки [9]

$$C_{\text{MIMO}} \approx M \cdot B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right),$$

где $M = \min(N_t, N_r)$ — число независимых пространственных потоков. По сути, система как бы создает несколько параллельных каналов в одной и той же полосе.

В практических 5G-системах используются конфигурации *Massive MIMO* (например, 64×64), которые позволяют одновременно формировать множество узких лучей (*beamforming*) и обслуживать сразу группу абонентов. Формирование луча применяется и в спутниковых системах: фазированные антенные решетки терминалов и наземных станций направляют энергию в нужную область пространства, повышая эффективное S/N для конкретного пользователя и уменьшая взаимные помехи между лучами.

3.3. Переход в миллиметровый диапазон и сравнение типовых сценариев [10]

Переход в миллиметровый диапазон связан прежде всего с возможностью использовать существенно более широкую полосу частот. Если в традиционных диапазонах сотовых систем ширина одной несущей обычно составляет порядка $B = 20$ МГц (типичный сценарий *LTE*), то в сетях нового поколения доступны конфигурации с полосой $B = 100$ МГц в диапазоне *sub-6* ГГц и до $B = 400$ МГц и выше в миллиметровом диапазоне. При этом в современных системах параллельно используется пространственное мультиплексирование: несколько независимых потоков данных передаются в одной и той же полосе за счет *MIMO*-технологий.

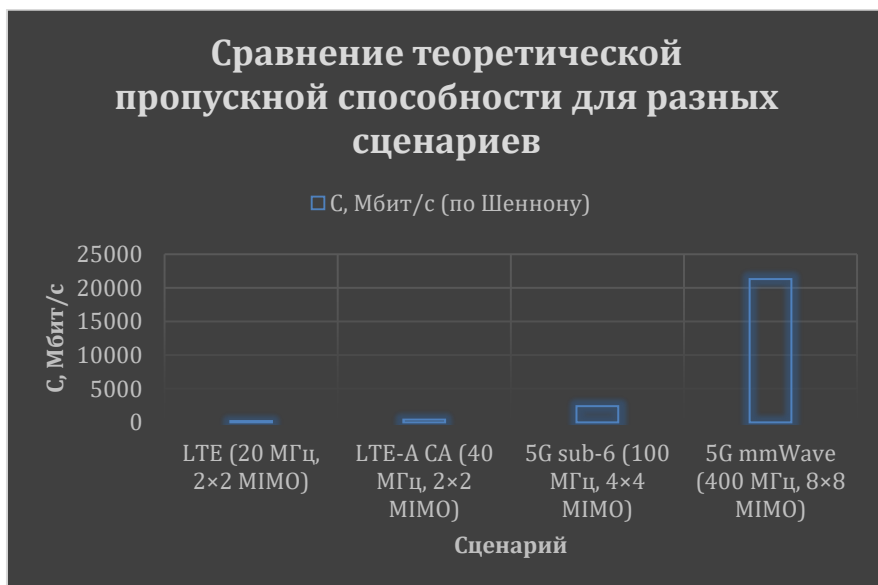


Рис. 1. Сравнение теоретической пропускной способности для различных сценариев (*LTE*, *LTE-A*, *5G sub-6*, *5G mmWave*).

Fig. 1. Comparison of theoretical throughput for different scenarios (*LTE*, *LTE-A*, *5G sub-6*, *5G mmWave*)

Если для упрощенной оценки зафиксировать отношение сигнал/шум $\frac{S}{N}$ на уровне, характерном для рабочих режимов соответствующих систем, и воспользоваться приближенной формулой

$$C \approx M \cdot B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right),$$

где M — число независимых пространственных потоков, можно сравнить теоретическую пропускную способность для нескольких типовых сценариев: *LTE* с полосой 20 МГц и конфигурацией 2×2 *MIMO*, *LTE-Advanced* с агрегацией до 40 МГц, *5G* в диапазоне *sub-6* ГГц с полосой 100 МГц и 4×4 *MIMO*, а также *5G mmWave* с полосой 400 МГц и многоантенной конфигурацией 8×8 . Результаты такого расчетного сравнения представлены на диаграмме (рис. 1). Из нее видно, что переход от узкополосных систем *LTE* к широкополосным конфигурациям *5G* в миллиметровом диапазоне в сочетании с ростом числа пространственных потоков дает многократное увеличение потенциальной скорости передачи данных. При этом достигается не только выигрыш за счет расширения полосы B , но и за счет более интенсивного использования пространственного ресурса канала, что хорошо согласуется с общими соотношениями для пропускной способности многоканальных систем связи [11].

4. Адаптивные методы на уровне модуляции и кодирования

На физическом уровне существенный вклад в достижимую скорость передачи данных вносит выбор схем модуляции и кодирования. В простейшей оценке число информационных бит, приходящихся на один символ, определяется величиной $\log_2 M$, где M — мощность сигнального созвездия (*QPSK*, *16-QAM*, *64-QAM*, *256-QAM* и т. д.). Увеличение порядка модуляции повышает спектральную эффективность, однако одновременно приводит к росту требуемого отношения сигнал/шум $\frac{S}{N}$ для обеспечения заданной вероятности ошибки [12].

Кодирование вводит контролируруемую избыточность и описывается коэффициентом кодовой скорости

$$R = \frac{k}{n},$$

где k — число информационных бит, n — длина кодового слова. При фиксированной полосе частот B эффективная скорость на физическом уровне приближенно может быть записана в виде

$$C_{\text{эфф}} \approx B \cdot R \cdot \log_2 M,$$

при этом сверху она ограничена шенноновским пределом [13]

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right).$$

Использование современных помехоустойчивых кодов (*LDPC*, турбо-, полярных) позволяет при умеренном запасе по $\frac{S}{N}$ существенно со-

кратить разрыв между $C_{\text{эфф}}$ и теоретическим пределом, повышая энергоэффективность системы.

В современных стандартах связи широкое распространение получили схемы адаптивной модуляции и кодирования (*Adaptive Modulation and Coding, AMC*). Передающая сторона периодически получает оценки качества канала (SNR , показатели ошибок, индексы CQI) и выбирает одну из предопределенных комбинаций (M, R) , описываемых индексом MCS . Абонентам с благоприятными условиями радиоканала назначаются более «быстрые» схемы с высокой порядковой модуляцией и увеличенной кодовой скоростью, абонентам на границе зоны обслуживания — более устойчивые схемы с меньшей эффективной скоростью. Такой подход позволяет при фиксированном B и неизменной аппаратной конфигурации повышать среднюю по сети скорость за счет адаптации параметров передачи к текущему состоянию канала [14].

5. Протокольные и архитектурные решения для повышения пользовательской скорости

На уровнях выше физического дисциплинирующую роль играет уже не столько пропускная способность канала C , сколько полезная скорость доставки данных приложениям. Для ее описания удобно вводить величину прикладной пропускной способности (*goodput*) C_{app} , которая учитывает долю служебного трафика и объем повторных передач. В простейшей модели можно записать

$$C_{\text{app}} \approx C_{\text{эфф}} \cdot (1 - \alpha_{\text{overhead}}) \cdot (1 - p_{\text{retx}}),$$

где α_{overhead} характеризует суммарные протокольные накладные расходы (заголовки, служебные сообщения, управляющие кадры), а p_{retx} отражает долю ресурса, расходуемого на повторную передачу ошибочно доставленных блоков.

Оптимизация транспортных протоколов направлена на уменьшение потерь, связанных с механизмами контроля перегрузки и реакцией на потери пакетов. Современные реализации *TCP* и *QUIC* с алгоритмами управления перегрузкой типа *CUBIC*, *BBR* и их модификациями позволяют более полно использовать продукт $C \cdot RTT$, уменьшать влияние избыточной буферизации и эффективнее работать как в наземных, так и в спутниковых каналах с ненулевой задержкой [15].

На канальном и сетевом уровнях важную роль играет сокращение протокольных накладных расходов: агрегация кадров в *Wi-Fi*, сжатие заголовков, более плотная пакетизация и эффективное планирование ресур-

сов в сотовых сетях приводят к уменьшению $\alpha_{overhead}$ и росту доли полезной нагрузки в общем трафике. Дополнительный эффект дают архитектурные решения — использование *CDN*, кэширование контента и размещение сервисов на *edge*-узлах. Формально такие меры не увеличивают предельную пропускную способность радиоканала C , однако позволяют большему объему полезных данных проходить через систему за единицу времени и тем самым повышают воспринимаемую пользователем скорость работы сервисов.

6. Заключение

В работе рассмотрен комплексный подход к повышению скорости передачи данных в современных беспроводных и спутниковых системах связи. Показано, что, несмотря на наличие фундаментального ограничения в виде формулы Шеннона, реальная скорость для пользователя определяется не только параметрами полосы B и отношения сигнал/шум S/N , но и тем, насколько эффективно используются частотный и пространственный ресурсы канала, а также протокольные и архитектурные механизмы. Пространственно-частотные методы — *OFDM/OFDMA*, агрегация несущих, *MIMO* и *Massive MIMO*, переход в миллиметровый диапазон — позволяюткратно увеличивать теоретическую пропускную способность при ограниченном спектре.

Отдельно подчеркнута роль адаптивных алгоритмов модуляции и кодирования, а также протокольных и архитектурных решений, которые определяют, какая часть теоретически достижимой скорости становится доступной прикладному уровню. На примере наземных сотовых сетей, сетей *Wi-Fi* и низкоорбитальных спутниковых систем видно, что максимальные пользовательские скорости достигаются не за счет одного «чудесного» механизма, а за счет согласованного применения сразу нескольких технологий. По мере дальнейшего усложнения архитектуры — роста размеров антенных решеток, освоения новых диапазонов, развития *edge*-инфраструктуры и спутниковых группировок — возрастает и значимость вопросов управления ресурсами и обеспечения кибербезопасности, без которых высокоскоростные системы связи не смогут оставаться надежной основой цифровой инфраструктуры.

Список литературы

1. Шеннон К. Э. Математическая теория связи. Работы по теории информации и кибернетике. М. : ИИЛ, 1963. 328 с.
2. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ. М. : Радио и связь, 2000. 800 с.

3. Goldsmith A. Wireless Communications. Cambridge : Cambridge University Press, 2005. 644 p.
4. Rappaport T. S. Wireless Communications : Principles and Practice. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 744 p.
5. Dahlman E., Parkvall S., Skold J. 5G NR : The Next Generation Wireless Access Technology. 2nd ed. London : Academic Press, 2020. 616 p.
6. Гошин Е. В. Теория информации и кодирования : учеб. пособие. Самара : Самарский университет, 2018. 123 с.
7. Бакулин М. Г., Крейндин В. Б., Шумов А. П. Проблемы и методы повышения спектральной эффективности систем связи: ортогональная передача // Цифровая обработка сигналов. 2014. № 2. С. 22—33.
8. Нестеренко А. Н. Математическая модель MIMO-OFDM сигнала // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. Вып. 4 (23).
9. Marzetta T. L. Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas//IEEE Transactions on Wireless Communications. 2010. Vol. 9, no. 11. P. 3590—3600.
10. Nee R., Prasad R. OFDM for Wireless Multimedia Communications. Boston : Artech House, 2000. 304 p.
11. IEEE Std 802.11ax-2021. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment 6: Enhancements for High Efficiency WLAN.
12. IEEE Std 802.11ad-2012. IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN MAC and PHY Specifications – Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band.
13. 3GPP TS 38.300. NR; NR and NG-RAN Overall description; Stage-2. – 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Release 16.
14. Мордвинова А. Ю. Анализ теоретических ограничений скорости передачи информации по беспроводному каналу связи. В сб. : Модели инновационных решений повышения конкурентоспособности отечественной науки. Сб. статей по итогам Всероссийской научно-практической конференции. Стерлитамак, 2022. С. 44—49.
15. Мордвинова А. Ю., Широков И. Б. Исследование влияния методов кодирования сигналов на скорость передачи данных в каналах связи. В сб. : Модели инновационных решений повышения конкурентоспособности отечественной науки. Сб. статей по итогам Всероссийской научно-практической конференции. Стерлитамак, 2022. С. 49—57.

Информация об авторах

Мордвинова Анна Юрьевна, старший преподаватель Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Широков Игорь Борисович, профессор Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

A Comprehensive Approach to Increasing Data Transmission Rates in Modern Wireless and Satellite Communication Systems

A. Yu. Mordvinova and I. B. Shirokov

Sevastopol State University
33, Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russian Federation
shirokov@ieee.org

Received: March 20, 2026

Peer-reviewed: March 26, 2026

Accepted: March 26, 2026

Abstract: The sharp increase in traffic across mobile and fixed communication networks, as well as the emergence of large satellite constellations such as Starlink, makes improving data transmission rates one of the key challenges for the industry. Simply “increasing transmitter power” or expanding the frequency band is no longer sufficient: the spectrum is limited, while quality-of-service requirements continue to grow. This paper examines a comprehensive approach to increasing user data rates in modern communication systems. It demonstrates how spatial-frequency multiplexing techniques (OFDM/OFDMA, carrier aggregation, MIMO and Massive MIMO, beam forming) combine with adaptive modulation and coding algorithms, as well as protocol- and architecture-level solutions (optimizing transport protocols, reducing overhead, applying caching and edge infrastructure). Using LTE/5G networks, next-generation Wi-Fi standards, and low-Earth-orbit satellite systems as examples, the paper discusses which technical solutions contribute most to the actual throughput experienced by end users. It is emphasized that further development of high-speed communication systems is inevitably linked to increased architectural complexity and higher requirements for resource management and security.

Keywords: data transmission rate, wireless and satellite communication systems, OFDM/OFDMA, carrier aggregation, MIMO and Massive MIMO, beamforming.

For citation (IEEE): A. Yu. Mordvinova and I. B. Shirokov, “A Comprehensive Approach to Increasing Data Transmission Rates in Modern Wireless and Satellite Communication Systems,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 3, pp. 463–475, 2026, doi: 10.21227/kkdb-ee23. (In Russ.).

References

1. C. E. Shannon, “A Mathematical Theory of Communication,” *Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379–423, 623–656, July, October, 1948.
2. J. Proakis, *Digital Communications*, 4th ed., New York: McGraw-Hill, 2000.

3. A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
4. T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed., Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.
5. E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*, 2nd ed., London: Academic Press, 2020.
6. E. V. Goshin, *Information Theory and Coding: a textbook*, Samara: Samara University, 2018. (In Russ.).
7. M. G. Bakulin, V. B. Kreindlin, and A. P. Shumov, "Problems and Methods of Increasing the Spectral Efficiency of Communication Systems: Orthogonal Transmission," *Digital Signal Processing*, no. 2. pp. 22–33, 2014. (In Russ.).
8. A. N. Nesterenko, Mathematical Model of a MIMO-OFDM Signal, *Science Studies* (online journal), iss. 4 (23), 2014. (In Russ.).
9. T. L. Marzetta, "Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 11, pp. 3590–3600, 2010.
10. R. Nee and R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*, Boston: Artech House, 2000.
11. IEEE Std 802.11ax-2021. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment 6: Enhancements for High Efficiency WLAN.
12. IEEE Std 802.11ad-2012. IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN MAC and PHY Specifications – Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band.
13. 3GPP TS 38.300. NR; NR and NG-RAN Overall description; Stage-2. – 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Release 16.
14. A. Yu. Mordvinova, "Analysis of theoretical limitations of the information transfer rate over a wireless communication channel," in *Models of innovative solutions for increasing the competitiveness of domestic science. Collection of articles from the All-Russian scientific and practical conference*, Sterlitamak, pp. 44–49, 2022.
15. A. Yu. Mordvinova and I. B. Shirokov, "Study of the influence of signal coding methods on the data transfer rate in communication channels," in *Models of innovative solutions for increasing the competitiveness of domestic science. Collection of articles from the All-Russian scientific and practical conference*, Sterlitamak, pp. 49–57, 2022.

Information about the authors

Ann Yu. Mordvinova, Senior Lecturer of Sevastopol state University, Sevastopol, Russian Federation.

Igor B. Shirokov, Professor of Sevastopol state University, Sevastopol, Russian Federation.

УДК 004

Эволюция технологий связи и управления в электроэнергетике Ирана: историко-технический анализ доцифровой эпохи

Рахмани Д.

*Московский технический университет связи и информатики
ул. Авиамоторная, д. 8А, Москва, 111024, Российская Федерация
jahed@mail.ru*

Получено: 4 декабря 2025 г.

Отрецензировано: 11 декабря 2025 г.

Принято к публикации: 11 декабря 2025 г.

Аннотация: Статья посвящена историко-техническому анализу эволюции технологий связи и управления в электроэнергетике Ирана в доцифровой период (1955—1998). Исследование выявляет основные этапы формирования коммуникационной инфраструктуры, начиная с использования аналоговой проводной телефонии и ручных процедур управления и заканчивая внедрением телесигнализации, релейной защиты, радиосвязи, систем «proto-SCADA» и аналоговых микроволновых линий. На основе анализа архивных документов, технических стандартов и сопоставления с международной практикой показано, что развитие происходило поступательно, через наложение технологий и расширение функциональности без резких технологических разрывов. Показано, что постепенная автоматизация, формирование сети регионального диспетчерского управления создали основу для последующей цифровизации. Выявлено, что архитектура будущих интеллектуальных сетей была заложена именно в аналоговый период, когда сформировались ключевые принципы сбора данных, оперативного контроля и обеспечения надежности. Полученные результаты обладают практической значимостью для понимания логики модернизации и выявления наследуемых ограничений и преимуществ, определяющих современное развитие электроэнергетического сектора Ирана.

Ключевые слова: электроэнергетика, аналоговые технологии, связь, управление, релейная защита, диспетчеризация.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Рахмани Д. Эволюция технологий связи и управления в электроэнергетике Ирана: историко-технический анализ доцифровой эпохи // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2026. Т. 9, № 3. С. 476—492.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Рахмани, Д. Эволюция технологий связи и управления в электроэнергетике Ирана: историко-технический анализ до-цифровой эпохи / Д. Рахмани // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2026. — Т. 9, № 2. — С. 476—492.

1. Введение

Развитие систем связи и управления в электроэнергетическом секторе является одной из технических основ современного развития энергетики. До появления цифровых технологий электрическая инфраструктура опиралась на сочетание аналоговых, электромеханических и телеметрических технологий, которые, хотя и были примитивными по современным меркам, сыграли решающую роль в формировании национальных электросетей. В Иране эта технологическая эволюция прошла по уникальной траектории, отмеченной стремительным ростом спроса на энергию на фоне поступательной индустриализации страны и необходимости обеспечить стабильность и безопасность энергетических систем. Несмотря на важность этого периода, систематический анализ методов связи и управления, использовавшихся в иранской электроэнергетике в доцифровую эпоху, остается недостаточно освещенным в научной литературе.

Существующие исследования подчеркивают, что эффективность любой электроэнергетической системы тесно зависит от качества мониторинга, координации и механизмов управления эксплуатацией, как отмечается в исследовании С. Ким [1]. До цифровизации эти функции основывались на технических решениях, таких как аналоговое дистанционное управление, кабельные телефонные сети, электромеханические реле или протоколы управления, основанные на низкоскоростных радиотехнологиях [2]. Несколько исследований также показывают, что в развивающихся странах развитие этих технологий повлияло на устойчивость сетей, планировочные возможности и оптимизацию энергетических потоков [3]. Для Ирана, чья энергосистема претерпела серию значительных расширений с середины XX века, изучение инструментов управления и коммуникации, использовавшихся до цифровой трансформации, имеет решающее значение для понимания технологических основ современного управления энергетикой.

Основная проблема этого исследования заключается в отсутствии детального исторического и научно-технического анализа коммуникационных и управленческих технологий, которые формировали функционирование иранского энергетического сектора в доцифровой период. Хотя недавние исследования в основном сосредоточены на современных тенденциях — умных сетях, цифровой автоматизации, алгоритмической оптими-

зации — они часто не учитывают техническую динамику, которая позволила перейти к этим новым подходам. Понимание этой динамики является необходимым условием для оценки логики эволюции инфраструктуры, выявления ограничений, унаследованных от предшествующей системы, и анализа технологической преемственности, сохраняющихся сегодня.

Цель настоящего исследования — проследить эволюцию технологий средств связи и управления в иранской электроэнергетике до появления цифровых систем, выделяя их технические характеристики, эксплуатационные функции и влияние на производительность и надежность сети. Центральная гипотеза основана на идее, что современную структуру иранской энергетической системы, особенно на этапе перехода к умным технологиям, нельзя понять без глубокого анализа аналоговых механизмов, которые составляли ее первоначальную основу. Предполагается, что доцифровые технологии не только определили функциональную архитектуру сети, но и сформировали институциональные практики, операционные модели и технологические приоритеты, которые и сегодня влияют на модернизацию отрасли.

Для подтверждения гипотезы исследования используется историко-технический аналитический подход, сочетающий изучение архивной технической документации, международных стандартов того времени, а также критический анализ фундаментальных научных работ, посвященных эволюции электросетей в аналогичных контекстах. Эта методология позволяет выявлять технологическую преемственность, реконструировать инженерную логику, направлявшую институциональные решения, и прояснять, как аналоговые решения подготовили почву для последующей цифровизации энергетических инфраструктур.

В условиях, когда переход к умным сетям и цифровой автоматизации является глобальным стратегическим приоритетом, такой тип исторического анализа имеет особое значение. Понимание технологического происхождения электрических систем не только проливает свет на факторы, которые формировали их эволюцию, но и позволяет нам лучше предвидеть возможные проблемы модернизации. Таким образом, это исследование способствует заполнению научного пробела и предлагает аналитическую основу, необходимую для интерпретации трансформаций, происходящих в энергетическом секторе Ирана.

2. Материалы и методы

Для решения поставленных задач была использована методология историко-технических исследований, адаптированная к специфике развития электроэнергетических систем и средств связи в Иране:

— Сравнительно-исторический метод, включая метод охватывающих сравнений, применялся для изучения особенностей формирования и модернизации технологий связи и диспетчерского управления в различных странах Ближнего Востока и Азии. Это позволило определить степень влияния зарубежных инженерных школ на иранскую электроэнергетику, а также выявить элементы самостоятельного технологического развития, обусловленные геополитическими, экономическими и техническими условиями Ирана.

— Историко-генетический (ретроспективный) метод использовался для анализа ключевых этапов становления систем связи и управления до цифровой эпохи: переходов от аналоговых схем к более сложным электромеханическим, изменения принципов диспетчеризации, эволюции оборудования подстанций и линий электропередачи. Метод позволил проследить как технические изменения (появление новых типов коммутаторов, телемеханики, сигнальных систем), так и социально-экономические факторы (рост энергопотребления, индустриализация, расширение сети электрификации).

— Проблемно-хронологический метод, а также частные методы историко-научного анализа применялись для систематизации этапов развития отрасли: от ранних аналоговых средств связи до внедрения первых автоматизированных систем управления. Антикваристский подход позволил реконструировать технические характеристики устаревшего оборудования, а современные методы анализа данных (включая элементы презентизма) обеспечили сопоставление исторических тенденций с текущим уровнем развития отрасли.

— Номотетический метод, основанный на выявлении общих закономерностей, использовался для обработки и интерпретации количественных данных: темпов расширения электросетей, масштабов внедрения телемеханики, степени централизации диспетчерского управления и изменений в технологической структуре энергосистемы. Это позволило определить устойчивые модели развития иранской электроэнергетики в доцифровой период.

Исследование в основном опирается на корпус первичных и вторичных источников, тщательно отобранных для реконструкции технологической архитектуры энергетической сети Ирана до внедрения информатики и цифровых систем. Материалы включают архивы технической документации национальных министерств и электротехнических компаний, руководства по эксплуатации аналогового оборудования, технические отчеты с 1950-х по 1990-е годы, а также специализированные публикации, посвященные технологиям удаленного управления, удаленной защиты и

мониторинга, применявшихся в этот период. Архивные документы, хранящиеся в иранских исследовательских центрах, включая планы сетей, схемы трансформаторных станций и отчеты по техническому обслуживанию, стали важной основой для реконструкции технологических практик. Эти материалы были дополнены публичными статистическими базами данных с временными рядами по расширению электроэнергетической инфраструктуры, оборудованию подстанций, структуре национальной диспетчеризации и развитию генерационных мощностей, как отмечает Дж. Лью и др. [4].

В рамках технического анализа был использован набор международных изданий и стандартов, таких как рекомендации МЭК (Международной электротехнической комиссии) и руководства по промышленной телекоммуникации конца XX века для сопоставления используемых в Иране систем с глобальными практиками того времени. Такой сравнительный метод позволяет оценить соответствие, расхождения и локальные адаптации аналоговых технологий. Анализируемое оборудование включает электромеханические реле, системы SCADA первого поколения на базе аналоговых сигналов, внутренние проводные телефонные устройства, системы импульсного дистанционного управления, а также модули VHF/UHF радиосвязи, использовавшиеся до распространения цифровых коммутационных систем [5].

Методология, принятая для обработки источников, разделена на несколько последовательных этапов. Первым шагом является систематический сбор документов, направленный на выявление всех случаев, связанных с технологиями коммуникации и управления, использовавшихся до цифровизации. Этот процесс включал обзор выбранных архивов, индексацию соответствующих технических элементов и создание внутренней базы данных информации, организованной по типу технологии, временному периоду, функциональности и географическому расположению. Особое внимание уделялось датированию материалов, чтобы обеспечить временную согласованность извлеченных данных.

Второй этап основан на качественном историко-техническом анализе. Цель данного исследования — реконструировать логику эволюции изучаемых технологий, выявить разрывы, непрерывности и моменты инноваций, а также выявить институциональные механизмы, повлиявшие на принятие или отказ от определенных технических решений. Этот анализ включает изучение функциональных характеристик аналоговых коммуникационных систем (надежность, пропускная способность, методы кодирования, уязвимость к возмущениям), а также изучение операционных моделей управления сетями до компьютеризации. Данные интерпретировались

с помощью сравнительного метода, что позволило сравнить траекторию Ирана с наблюдаемой в других странах с прогрессивной индустриализацией, чтобы понять национальные особенности и внешние детерминанты, определяющие развитие энергетики Ирана.

Третий этап методологии касается системного и структурного анализа. Цель — оценить интеграцию коммуникационных технологий в энергетическую систему в целом. Для этого была проведена схематическая реконструкция информационных потоков и функций управления на основе технических документов. Эта реконструкция позволила изучить роль аналоговых технологий в координации производства, передачи и распределения электроэнергии. Реконструированные схемы были рассмотрены в соответствии с критериями надежности эксплуатации, избыточности каналов связи, скорости передачи данных и способности реагировать на сетевые нарушения. Технический анализ дополнялся упрощенным моделированием аналоговых коммуникационных цепочек, выполненным с использованием стандартного программного обеспечения технического картирования (такого как *AutoCAD* и *Visio*), чтобы проверить функциональную согласованность исторических реконструкций.

Четвертый этап посвящен критической оценке производительности аналоговых систем в контексте их времени. Оценка основана на извлеченных технических данных, операционных отчетах и вторичных исследованиях с целью оценки влияния технологий на надежность электросети, сокращение количества отключений и способности предотвратить инциденты. Хотя отсутствие стандартизированных числовых данных за этот период затрудняет строго количественный анализ, были установлены качественные показатели, такие как частота сообщений о сбоях, плотность коммуникационной сети, степень централизации диспетчерских операций и сложность операционных процедур.

Наконец, был разработан методологический протокол оценки для проверки надежности научной интерпретации. Этот протокол включает: (1) триангуляцию источников, гарантирующую, что каждое заключение основано как минимум на двух различных типах материалов; (2) критический анализ потенциальных предвзятостей институциональных архивов; (3) междисциплинарная валидация в сравнении с исследованиями в области истории технологий, энергетической инженерии и социологии инфраструктуры. Все эти измерения подтверждают надежность результатов и обеспечивают методологическую согласованность, адаптированную к сложной теме, находящейся на пересечении технологической истории и энергетических исследований.

3. Результаты

Анализ научно-технической документации выявил несколько отдельных этапов эволюции коммуникационных и управленческих технологий в иранском электроэнергетическом секторе до появления цифровых систем. Приведенные ниже результаты следуют строго хронологическому порядку и описывают наблюдаемые технические характеристики, используемые инфраструктуры, а также последовательные преобразования информационных и управляющих сетей.

Первые документы, датируемые 1955—1965 годами, свидетельствуют о почти исключительном использовании систем связи на основе аналоговой проводной телефонии в первых серийных трансформаторных станциях. Внутренние сети в основном состояли из выделенных медных линий, интегрированных непосредственно в подстанции. Журналы эксплуатации показывают, что эти линии предназначались для согласования голосовой связи между операторами и не включали автоматические устройства передачи данных. Протоколы управления полностью опирались на прямую человеческую коммуникацию и рукописные журналы записи [6].

С 1966 года в нескольких передающих установках наблюдалось постепенное внедрение аналоговых систем дистанционного управления с помощью импульсных сигналов. Технические отчеты подтверждают наличие устройств, позволяющих дистанционно коммутировать переключатели, работающие с помощью однонаправленных сигналов, передаваемых по тем же проводным линиям. Эти системы не обеспечивали автоматической обратной связи, что ограничивало их использование базовыми операциями управления.

Анализ технической документации, датируемой 1970—1978 годами, свидетельствуют о значительном расширении внутренних коммуникационных сетей. В этот период на новых подстанциях широко внедряются высокочувствительные электромеханические реле [7, 8]. Технические записи показывают, что интеграция реле защиты индукционных дисков позволила автоматизировать некоторые механизмы отключения в случае перегрузки, хотя передача информации в центры управления пока не вышла за рамки аналоговой стадии. Технические планы также показывают внедрение первых *VHF*-радиосвязей для оперативной связи в горных районах, где прокладка проводных линий была затруднена.

После революции 1979 года управление иранской электроэнергетикой претерпело глубокие изменения: иностранные компании и подрядчики ушли из страны, прежние организационные структуры были распущены или объединены, а формирование новой, централизованной системы кон-

троля перешло в руки государства. Новые станции, введенные в эксплуатацию в период с 1980 по 1988 год, систематически оснащались аналоговыми дистанционными мониторами, позволяющими передавать простые переменные, такие как напряжение или ток, в виде непрерывных изменений сигнала. Диаграммы, извлеченные из технических архивов, показывают, что эти устройства были связаны с региональными диспетчерскими центрами, созданными в этот период для централизации контроля за сетью. Имеющиеся данные свидетельствуют об увеличении числа активных аналоговых каналов в сетях передачи, что позволяло более регулярно наблюдать рабочие параметры [9].

Результаты также показывают, что с 1989 года набор промежуточных технологий, описываемых в литературе как «прото-SCADA» системы, был внедрен в нескольких высоковольтных подстанциях. Отчеты об установке описывают использование многоканальных аналоговых модулей передачи, что позволяло собирать более полные данные и увеличивать централизацию в региональных центрах. Данные системы могли одновременно передавать результаты нескольких аналоговых измерений, хотя сигналы оставались подвержены помехам и возмущениям. Однако в этот период нет сведений об использовании цифровых протоколов [10].

Наконец, данные за период 1990—1998 годов показывают значительный рост национальной коммуникационной сети в электроэнергетике. Годовые показатели свидетельствуют о создании аналоговых микроволновых связей между главными городами и передающими станциями [11—15]. Эти связи сыграли центральную роль в расширении национальной системы диспетчеризации. Технические карты показывают постепенное уплотнение коммуникационной сети с добавлением ретрансляторов, направленных на расширение географического покрытия. Эта инфраструктура послужила основой для последующего внедрения первых цифровых систем, хотя они не относятся к изучаемому периоду. Точное разделение периодов обусловлено тем, что переходы между технологическими этапами в иранской электроэнергетике документированы в отчетах по модернизации сети, технических спецификациях оборудования и государственных программах развития отрасли. В большинстве случаев годы внедрения новых систем (например, переход к VHF-связи, появление прототипов SCADA или развертывание микроволновых линий) указаны достаточно четко, что позволяет установить границы этапов с годовой точностью, а не применять укрупненные интервальные оценки. Использовались архивные данные, например, *National Archives (United States)* — «*Electric power in Iran 1924–1925*» — о первых десятилетиях развития электросети

в Иране¹, отчет «*Statistical Report on 49 Years of Activities of Iran Electric Power Industry (1967–2015)*», который дает статистику по развитию отрасли за 50 лет².

Табл. 1. Эволюция коммуникационных и управленческих технологий в иранской электроэнергетике (1955—1998).

Table 1. Evolution of communication and management technologies in the Iranian electric power industry (1955–1998)

Период	Ключевые технологии	Технические характеристики	Выполняемые функции	Наблюдаемые ограничения
1955–1965	Аналоговая проводная телефония	Выделенные медные линии; Без автоматической связи	Голосовая связь; Координация операторов	Полная зависимость от оператора; Отсутствие непрерывных данных
1966–1969	Аналоговое дистанционное управление с помощью импульсных сигналов	Односторонняя передача по проводным линиям	Удаленное управление выключателями	Отсутствие обратной связи; Низкая надежность при нарушениях
1970–1978	Электромеханические реле; VHF-радиосвязи	Частичная автоматизация защиты; Сложная радиосвязь	Защита в случае перегрузки; Срочные операции	Аналоговая передача с чувствительностью к помехам; Ограниченное радиопокрытие
1980–1988	Аналоговый удаленный мониторинг; Региональная диспетчеризация	Передача напряжения/тока в виде прямых сигналов; Более активные каналы	Централизованный надзор; Регулярное наблюдение за сетью	Ограниченный объем данных; Отсутствие цифровизации
1989–1990	Многоканальные аналоговые прототипные системы SCADA	Одновременная передача нескольких аналоговых сигналов	Более полный сбор данных; Централизация	Повышенная чувствительность к нарушениям; Отсутствие цифровых протоколов
1990–1998	Аналоговые микроволновые связи	Дальние трансляции; Взаимосвязь центров	Расширение национальной диспетчеризации, надежная связь	Вместимость ограничена аналоговой природой

Таким образом, можно выделить несколько этапов развития технологий связи и управления в электроэнергетике Ирана, каждый из которых сопровождается появлением более эффективных инструментов, но при этом закреплён в аналоговой парадигме. Выявлено также несколько структурных тенденций.

¹ <https://archive.org/details/electric-power-in-iran>

² https://policy.asiapacificenergy.org/sites/default/files/Statistical%20Report_red.pdf

1. Эволюция происходит послойно: для каждого нового этапа характерны периоды сосуществования технологий с постепенным вытеснением действующих технологий новыми. Такая технологическая суперпозиция характерна для растущих энергетических систем и объясняет длительное сосуществование разнородных решений (например, УКВ-радио и микроволновых каналов в 1990-х годах).

2. Переход от проводной телефонии к электромеханическим системам дистанционного управления и ретрансляции свидетельствует о растущем стремлении снизить зависимость качества передачи информации от человеческого фактора. Технологии, введенные в период с 1970 по 1988 год, наглядно подтверждают этот переход, когда защита сети стала опираться на технические устройства, а не на операционные процедуры.

3. Структурированная роль аналогового удаленного мониторинга. Внедрение удаленного мониторинга в период с 1980 по 1988 год стало важной технической вехой. Впервые стала возможна регулярная передача электрических параметров, что стало незаменимой основой для дальнейшего появления цифровых систем. Из проведенного исследования следует, что этот шаг знаменует переход от преимущественно реактивной сети к частично проактивной.

4. Появление прото-SCADA как ключевой фазы. Многоканальные системы конца 1980-х гг. иллюстрируют усилия по увеличению плотности информации без цифровизации. Это период, когда аналоговая архитектура достигает своих функциональных пределов, что делает цифровой переход технически неизбежным.

5. Стратегическое значение микроволновых каналов. Данные за 1990—1998 годы показывают, что аналоговая микроволновая связь сыграла фундаментальную роль в структурировании национальной диспетчерской сети. Проведенное исследование показывает, что эта инфраструктура, хотя и еще до цифровой формы, представляет собой первую реальную междугороднюю коммуникационную структуру, позволяющую осуществлять обширный надзор за сетью.

Исследование показывает, что развитие системы проходило поэтапно. В 1955—1970 годах была заложена ее базовая организационная структура, опирающаяся на ручные формы коммуникации. В период 1970—1988 годов система постепенно переходила к автоматизации благодаря внедрению электромеханических реле и аналогового мониторинга. С 1989 по 1998 год началась ранняя цифровизация: появились гибридные технические решения, которые обозначили переход к компьютеризованным технологиям.

Таким образом, цифровизация не была результатом внезапного прорыва, а непрерывного технического созревания, структурированного предыдущими аналоговыми инфраструктурами.

Результаты исследования демонстрируют постепенную техническую эволюцию, характеризующуюся переходом от полностью ручной системы к частично автоматизированным механизмам с растущей интеграцией специализированных аналоговых каналов связи; формированием иерархической диспетчерской сети до компьютеризации; появлением в конце изучаемого периода гибридных структур, предвосхищающих цифровизацию сектора.

4. Обсуждение

Исторический и технико-функциональный анализ коммуникационных технологий, использовавшихся в иранской электроэнергетике до цифровой эры, позволяет выделить несколько структурных динамик, которые проливают свет на общую траекторию модернизации сектора. Полученные результаты показывают, что технологическая эволюция происходила постепенно, на последовательных уровнях, в ответ на географические, институциональные и операционные ограничения национальной электроэнергетической системы. Эти наблюдения позволяют нам с точностью интерпретировать роль аналоговых технологий в формировании сетевой архитектуры, способной поддержать спустя несколько десятилетий переход к цифровизации³.

Первым заметным элементом является первоначальная зависимость от аналоговых проводных коммуникаций, отмеченная в документах периода 1955—1965 годов. Их исключительное использование подчеркивает не только техническое ограничение, но и организационную конфигурацию, характерную для электрических систем на этапе первичного расширения. Отсутствие автоматической удаленной передачи данных, наблюдаемой на станциях этого периода, подтверждает центральную роль человеческого фактора в управлении сетью. Эта ситуация иллюстрирует режим работы, при котором координация основывалась скорее на процедурах, чем на интегрированных технических механизмах. Важность этого наблюдения для цели исследования заключается в выделении неавтоматизированных фундаментов, на которых была построена последующая структура диспетчеризации.

³ Khodabakhshi R. Challenges and opportunities of information technology in the electrical industry // Мат-лы 5-й Междунар. конф. по электротехнике и вычислительной технике с акцентом на индустриализацию. 2016.

Ввод аналоговых систем дистанционного управления с 1966 года стал вторым важным результатом. Их появление свидетельствует о институциональном стремлении повысить скорость вмешательства в сети, одновременно выявляя присущие ограничения однонаправленных технологий без обратной связи. Это наблюдение подтверждает гипотезу о том, что первые формы автоматизации в иранской электроэнергетике еще не были направлены на системную трансформацию, а удовлетворяли периодические потребности в дистанционном управлении. Отсутствие истинного цикла обратной связи отражает технологический дизайн, где главной целью была не интеграция, а минимальная операционная функциональность [16].

Фаза, охватывающая 1970—1978 годы, предоставляет особенно значимый набор наблюдений. Подтвержденное расширение электромеханических реле и радиосвязей в труднодоступных районах показывает, что технологическая эволюция была не однородной, а сильно обусловлена региональным рельефом и социально-экономическими особенностями. Эти технологические асимметрии являются важнейшим элементом для понимания гетерогенной структуры национальной сети в последующие десятилетия. Кроме того, появление высокочастотных радиосвязей (*VHF/UHF* — очень высокие частоты / ультра высокие частоты) свидетельствует о технической адаптации к специфическим локальным условиям, косвенно предвосхищая будущую потребность в более гибкой коммуникационной сети.

Появление после 1979 года аналоговых систем дистанционного мониторинга представляет собой качественный прорыв. Это развитие стало первой структурированной попыткой централизовать наблюдение за сетью и обеспечить регулярную циркуляцию аналоговой информации между станциями и региональными центрами. Подтвержденное существование этих систем соответствует центральной гипотезе исследования: последующая цифровизация не возникла *ex nihilo*, а была частью логики постепенного улучшения коммуникационных возможностей, установленных в доцифровой эпохе. Собранные данные показывают, что увеличение числа активных аналоговых каналов постепенно изменило баланс между прямым вмешательством человека и технической обработкой информации.

Период 1989—1998 годов демонстрирует особенно значимые результаты с точки зрения технологических переходов. Первые системы, описанные как «прото-SCADA» (*Supervisory Control And Data Acquisition*), свидетельствуют о попытке увеличить плотность передаваемых данных без разрыва с аналоговой парадигмой. Гибридный характер этих систем — важное наблюдение: это промежуточный этап, когда существующие инфраструктуры были доведены до максимальной мощности, и их можно считать предвестниками первых цифровых архитектур. Эта эволюция, хо-

тя и линейная в техническом развитии, соответствует переломному моменту в истории энергетического сектора Ирана.

Следует отметить длительное существование аналоговых радиосистем даже после появления первых микроволновых инфраструктур. Документы показывают, что эти две технологии сосуществовали несколько лет, что свидетельствует о институциональной нерешительности или осторожности по поводу рисков, связанных с слишком быстрой модернизацией. Это сосуществование также говорит о необходимости поддерживать дублирующие решения в расширяющейся энергетической системе, которая формирует практики управления рисками в иранском секторе [17].

В целом результаты подтверждают актуальность сформулированной гипотезы: цифровизация иранского энергетического сектора была бы невозможна без существования сложной аналоговой архитектуры, постепенно развивавшейся в 1955—1998 гг. Наблюдаемые технические преобразования — от проводной телефонии до радиосвязей, от электромеханических реле до систем удаленного мониторинга — показывают накопительную и адаптивную эволюцию, а не череду внезапных скачков. Эта преемственность является важным моментом для понимания иранской специфики в технологической истории ее энергетического сектора.

5. Выводы

Исследование подчеркивает постепенную, стратифицированную и технически согласованную эволюцию коммуникационных и управленческих технологий, использовавшихся в иранской электроэнергетике до цифровизации. Результаты показывают, что развитие электросети основывалось на последовательности аналоговых технологий, сложность и масштаб которых со временем росли. Это способствовало формированию архитектуры управления, достаточно надежной для поддержки цифровых систем в будущем.

Значимость этих наблюдений заключается в демонстрации того, что аналоговые инфраструктуры стали незаменимой основой для перехода к современным умным сетям. Понимание этой траектории дает важные практические последствия: позволяет выявить структурные преемственности, которые до сих пор влияют на направления модернизации; проливает свет на причины некоторых устойчивых уязвимостей в системе управления энергией; предоставляет полезную историческую основу для долгосрочного технологического планирования.

Результаты свидетельствуют о том, что будущая политика модернизации должна учитывать меняющийся характер старой инфраструктуры —

будь то ее сохранение, адаптация или замена. Подробный исторический анализ доцифрового периода таким образом раскрывает не только технические корни современной энергетической системы, но и потенциальные рычаги ее будущей трансформации.

Список литературы

1. Kim S. et al. Perspectives of oxy-coal power plants equipped with CO₂ capture, utilization, and storage in terms of energy, economic, and environmental impacts // *Energy Conversion and Management*. 2022. Vol. 273. Art. 116361.
2. Кариани З. С., Окорочков Р. В. Особенности реализации ESG-стратегий устойчивого развития в деятельности иранских промышленных компаний // *Вестник Академии знаний*. 2024. № 5(64). С. 664—669.
3. Benatia D., Johnstone N., Hascic I. Effectiveness of Policies and Strategies to Increase the Capacity Utilisation of Intermittent Renewable Power Plants // *OECD Environment Working Papers*. OECD Publishing, 2013.
4. Liu J. et al. How to improve total factor energy efficiency under climate change: does export sophistication matter? // *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30, no. 10. P. 28162–28172.
5. Lu M., Daixu L., Peng W., Ruiqi M. Heterogeneous environmental regulation tools and green economy development : evidence from China // *Environmental Research Communications*. 2023. Vol. 5, no. 1. Art. 015007.
6. Norouzi A., Manzoor D. Blockchain technology applications in the energy sector : A review of challenges and opportunities // *Iranian Journal of Energy*. 2019. Vol. 22, no. 2. P. 23–58.
7. Peng H. R., Zhang Y. J., Liu J. Y. The energy rebound effect of digital development : Evidence from 285 cities in China // *Energy*. 2023. Vol. 270. Art. 126837.
8. Shen Y., Zhang X. Intelligent manufacturing, green technological innovation and environmental pollution // *Journal of Innovation & Knowledge*. 2023. Vol. 8, no. 3. Art. 100384.
9. Verhoef P. C. et al. Digital transformation : A multidisciplinary reflection and research agenda // *Journal of Business Research*. 2021. Vol. 122. P. 889–901.
10. Wu H., Han M., Shen Y. Technology-driven energy revolution: the impact of digital technology on energy efficiency and its mechanism // *Frontiers in Energy Research*. 2023. Vol. 11. Art. 1242580.
11. Гузикова Л. А. Проблема экономической эффективности цифровой трансформации производственных компаний. В кн. : *Цифровая экономика и Индустрия 5.0 : развитие в новой реальности*. СПб., 2022. С. 128—146.
12. Кариани З. С., Окорочков Р. В. Особенности реализации ESG-стратегий устойчивого развития в деятельности иранских промышленных компаний // *Вестник Академии знаний*. 2024. № 5(64). С. 664—669.
13. Benatia D., Johnstone N., Hascic I. Effectiveness of Policies and Strategies to Increase the Capacity Utilisation of Intermittent Renewable Power Plants. *OECD Environment Working Papers* no. 57. OECD Publishing, 2013.
14. Cheng Z., Yu X., Zhang Y. Is the construction of new energy demonstration cities conducive to improvements in energy efficiency? // *Energy*. 2023. Vol. 263, part A. Art. 125517.
15. Heidari H., Akbari M., Souhankar A., Hafezi R. Review of global energy trends towards 2040 and recommendations for Iran oil and gas sector // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2022. Vol. 19, no. 8. P. 8007–8018.

16. Kim S. et al. Perspectives of oxy-coal power plants equipped with CO₂ capture, utilization, and storage in terms of energy, economic, and environmental impacts // *Energy Conversion and Management*. 2022. Vol. 273. Art. 116361.
17. Liere-Netheler K., Packmohr S., Vogelsang K. Drivers of digital transformation in manufacturing. In : *Proceedings of the 51st Hawaii International Conference on System Sciences*. 2018. P. 3926–3935.

Сведения об авторе

Рахмани Джахед, старший преподаватель кафедры «Сетевые информационные технологии и сервисы» факультета информационных технологий Московского технического университета связи и информатики, Москва, Российская Федерация.

The Evolution of Communications and Control Technologies in the Iranian Electric Power Industry: A Historical and Technical Analysis of the Pre-Digital Era

J. Rahmani

Moscow Technical University of Communications and Informatics
Aviamotornaya St., buil. 8A, Moscow, 111024, Russian Federation

jahed@mail.ru

Received: December 4, 2025

Peer-reviewed: December 11, 2025

Accepted: December 11, 2025

Abstract: This article provides a historical and technical analysis of the evolution of communications and control technologies in the Iranian electric power industry during the pre-digital era (1955–1998). The study identifies the key stages in the development of communications infrastructure, beginning with the use of analog wired telephony and manual control procedures and ending with the introduction of telesignaling, relay protection, radio communications, proto-SCADA systems, and analog microwave links. Based on an analysis of archival documents, technical standards, and comparison with international practice, it is shown that development occurred progressively, through the layering of technologies and the expansion of functionality without sharp technological discontinuities. It is shown that gradual automation and the formation of a regional dispatch control network laid the foundation for subsequent digitalization. It was revealed that the architecture of future smart grids was laid out precisely in the analog era, when key principles of data collection, operational control, and reliability were formed. The obtained results have practical significance for understanding the logic of modernization and identifying the inherent limitations and advantages that determine the current development of Iran's electric power sector.

Keywords: electric power, analog technologies, communications, control, relay protection, dispatching.

For citation (IEEE): J. Rahmani, “The Evolution of Communications and Control Technologies in the Iranian Electric Power Industry: A Historical and Technical Analysis of the Pre-Digital Era,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 3, pp. 476–492, 2026, doi: 10.21227/p0kp-4703. (In Russ.).

References

- [1] S. Kim, et al., “Perspectives of oxy-coal power plants equipped with CO₂ capture, utilization, and storage in terms of energy, economic, and environmental impacts,” *Energy Conversion and Management*, vol. 273, art. 116361, 2022.

- [2] Z. S. Kariani and R. V. Okorokov, "Features of the implementation of ESG strategies for sustainable development in the activities of Iranian industrial companies," *Bulletin of the Academy of Knowledge*, no. 5(64), pp. 664–669, 2024. (In Russ.).
- [3] D. Benatia, N. Johnstone, and I. Hascic, "Effectiveness of Policies and Strategies to Increase the Capacity Utilization of Intermittent Renewable Power Plants," *OECD Environment Working Papers*, OECD Publishing, 2013.
- [4] J. Liu, et al., "How to improve total factor energy efficiency under climate change: does export sophistication matter?" *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, no. 10, pp. 28162–28172, 2023.
- [5] M. Lu, L. Daixu, W. Peng, and M. Ruiqi, "Heterogeneous environmental regulation tools and green economy development: evidence from China," *Environmental Research Communications*, vol. 5, no. 1, art. 015007, 2023.
- [6] A. Norouzi and D. Manzoor, "Blockchain technology applications in the energy sector: A review of challenges and opportunities," *Iranian Journal of Energy*, vol. 22, no. 2, pp. 23–58, 2019.
- [7] H. R. Peng, Y. J. Zhang, and J. Y. Liu, "The energy rebound effect of digital development: Evidence from 285 cities in China," *Energy*, vol. 270, art. 126837, 2023.
- [8] Y. Shen and X. Zhang, "Intelligent manufacturing, green technological innovation, and environmental pollution," *Journal of Innovation & Knowledge*, vol. 8, no. 3, art. 100384, 2023.
- [9] P. C. Verhoef, et al., "Digital transformation: A multidisciplinary reflection and research agenda," *Journal of Business Research*, vol. 122, pp. 889–901, 2021.
- [10] H. Wu, M. Han, and Y. Shen, "Technology-driven energy revolution: the impact of digital technology on energy efficiency and its mechanism," *Frontiers in Energy Research*, vol. 11, art. 1242580, 2023.
- [11] L. A. Guzikova, "The problem of economic efficiency of digital transformation of manufacturing companies," in *Digital Economy and Industry 5.0: Development in the New Reality*, St. Petersburg, pp. 128–146, 2022. (In Russ.).
- [12] Z. S. Kariani and R. V. Okorokov, "Features of the implementation of ESG strategies for sustainable development in the activities of Iranian industrial companies," *Bulletin of the Academy of Knowledge*, no. 5(64), pp. 664–669, 2024. (In Russ.).
- [13] D. Benatia, N. Johnstone, and I. Hascic, *Effectiveness of Policies and Strategies to Increase the Capacity Utilization of Intermittent Renewable Power Plants*, *OECD Environment Working Papers no. 57*, OECD Publishing, 2013.
- [14] Z. Cheng, X. Yu, and Y. Zhang, "Is the construction of new energy demonstration cities conducive to improvements in energy efficiency?" *Energy*, vol. 263, part A, art. 125517, 2023.
- [15] H. Heidari, M. Akbari, A. Souhankar, and R. Hafezi, "Review of global energy trends towards 2040 and recommendations for Iran oil and gas sector," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 19, no. 8, pp. 8007–8018, 2022.
- [16] S. Kim, et al., Perspectives of oxy-coal power plants equipped with CO₂ capture, utilization, and storage in terms of energy, economic, and environmental impacts," *Energy Conversion and Management*, vol. 273, art. 116361, 2022.
- [17] K. Liere-Netheler, S. Packmohr, and K. Vogelsang, "Drivers of digital transformation in manufacturing," in *Proceedings of the 51st Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 3926–3935, 2018.

Information about the author

Jahed Rahmani, Senior Lecturer, Department of Network Information Technologies and Services, Faculty of Information Technology, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russian Federation.

УДК 001(091):351.814.3

История создания радиотехнических систем ближней навигации в НИИ-33 — ВНИИРА (1951—2005 гг.)

Ермолов П. П., Катеринчук В. И., Слёзкин Г. В.

*Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация
ppuermolov@sevsu.ru*

Получено: 14 февраля 2026 г.

Отрецензировано: 9 марта 2026 г.

Принято к публикации: 9 марта 2026 г.

Аннотация: В статье представлена история создания радиотехнических систем ближней навигации в НИИ-33 — ВНИИРА за период 1951—2005 гг. Рассмотрены назначение радиотехнических систем ближней навигации (РСБН), принципы построения азимутально-дальномерной системы ближней радионавигации, характеристики наземного оборудования (радиомаяков РСБН), бортовой аппаратуры РСБН, имитаторы навигационно-посадочного оборудования, бортовые антенно-фидерные системы и бортовые пилотажно-навигационные системы управления самолетом. Визуализация результатов настоящего исследования проведена с использованием методологии «компендиум — таблица — инфографика» (КТИ), основанной на трех последовательных уровнях преобразования контента.

Ключевые слова: НИИ-33, Всероссийский НИИ радиоаппаратуры (ВНИИРА), радиотехнические системы ближней навигации, азимутально-дальномерная система, радиомаяки, имитаторы навигационно-посадочного оборудования, бортовые антенно-фидерные системы, бортовые пилотажно-навигационные системы управления самолетом.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Ермолов П. П., Катеринчук В. И., Слёзкин Г. В. История создания радиотехнических систем ближней навигации в НИИ-33 — ВНИИРА (1951—2005) // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2026. Т. 9, № 3. С. 493—522.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Ермолов, П. П. История создания радиотехнических систем ближней навигации в НИИ-33 — ВНИИРА (1951—2005) / П. П. Ермолов, В. И. Катеринчук, Г. В. Слёзкин // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2026. — Т. 9, № 3. — С. 493—522.

1. Введение

НИИ-33 — ВНИИРА — ведущий научно-технический центр по созданию радиотехнических средств и систем навигации, посадки и управления воздушным движением. Работы, выполненные коллективом ученых и специалистов института, оказали существенное влияние на повышение эффективности и безопасности воздушного движения в СССР и Российской Федерации. Ранее история создания радиомаячной системы инструментальной посадки 2-сантиметрового диапазона «Вымпел», а также хронология успешной автоматической посадки орбитального корабля «Буран» 15 ноября 1988 г. была отражена в [1]. В [2] рассмотрена научно-исследовательская деятельность главного конструктора направления интегрированных систем навигации и посадки в 1975—2025 гг.

История создания в НИИ-33 — ВНИИРА радиотехнических систем посадки самолетов (в качестве примера, иллюстрирующего использование методологии «компендиум — таблица — инфографика», основанной на трех последовательных уровнях преобразования контента) приведена в статье [3]. В настоящей статье с использованием этой же методологии приведена история создания радиотехнических систем ближней навигации в НИИ-33 — ВНИИРА. Проведенное исследование (как и предыдущие) основывается на материалах рукописи [4].

2. Назначение радиотехнических систем ближней навигации

Бортовое оборудование азимутально-дальномерных систем ближней радионавигации в сочетании с автономными средствами на современных летательных аппаратах входит в состав бортовых навигационно-пилотажных комплексов, позволяющих с использованием бортовых вычислителей решать навигационные задачи в пределах больших пространств с высокими точностями.

Радиомаячная система ближней навигации непрерывно совершенствовалась в части повышения точности, надежности, увеличения количества выполняемых функций и решения новых задач самолетовождения, таких как обеспечение процесса инструментальной посадки, взаимное определение координат между летательными аппаратами и обеспечение полета строем (межсамолетная навигация), использование навигационных каналов для передачи необходимой информации (цифровая линия передачи данных), зависимое наблюдение (отображение воздушной обстановки и координат ЛА на наземном радиомаяке).

К настоящему времени накопился достаточно большой опыт по использованию азимутально-дальномерных систем ближней радионавига-

ции. На территории СНГ было развернуто около 1000 радиомаяков РСБН. Из них около 400 радиомаяков обеспечивало единое навигационное поле. Около 600 радиомаяков находилось в эксплуатации в отдельных воинских частях и летных предприятиях.

На летательных аппаратах было установлено около 20000 комплектов бортового оборудования РСБН. Бортовым оборудованием РСБН были оснащены все гражданские самолеты, эксплуатируемые на магистральных авиалиниях, все самолеты ВВС, часть вертолетов и некоторая часть самолетов местных воздушных линий.

В процессе развития РСБН была реализована возможность работы системы не только во всенаправленном режиме работы, но и в направленном режиме задания навигационных координат. Направленный режим работы позволяет реализовать существенно лучшие характеристики по сравнению с всенаправленным режимом. В частности, для направленного режима выделено большее число каналов (176 по сравнению с 40/88 каналами всенаправленного режима), возможности направленного режима позволяют реализовать больший потенциал линии связи, более высокую помехозащищенность системы. Внедрение направленного режима было реализовано для всех типов бортового и наземного оборудования, начиная с 3-го поколения, что составило около 50 % парка бортового оборудования летательных аппаратов.

3. Принципы построения азимутально-дальномерной системы ближней радионавигации

Принципы, используемые в азимутально-дальномерных системах ближней радионавигации, формировались постепенно, по мере развития в Советском Союзе радионавигационной и радиолокационной техники.

Создание первых отечественных радиомаяков посадки самолетов и радиолокационных станций обусловило возможность выбора технического метода построения угломерного и дальномерного каналов системы ближней радионавигации. В основу радиодальномера навигационной системы был положен импульсный радиолокационный принцип. При этом использовался метод «вторичной радиолокации».

Как показал первый опыт создания курсовых радиомаяков посадки самолетов, значительное влияние на их точность оказывал эффект отражения электромагнитных волн от местных предметов. В 1951 г. Г. А. Пахолковым было предложено использовать в курсовом радиомаяке направленные антенны, что в значительной мере снизило ошибки, вызывающие искривление курсовой линии радиомаяка (секторные курсовые радиомаяки).

Естественным было использование остронаправленных антенн и в азимутальном канале РСБН с целью повышения точности в условиях различного рода помех и, в том числе помех, обусловленных отраженными сигналами. В связи с этим был применен метод кругового сканирования направленной антенны, а само измерение азимута производилось путем определения времени между началом цикла сканирования луча (северным направлением) и его направлением на ЛА.

В 1951 г. в ряде работ указывалось также на возможность борьбы с вредным эффектом отражений путем использования широкополосных сигналов. Наиболее просто удалось реализовать эту идею в дальномерном канале, где использовались короткие радиоимпульсы при достаточно большой ширине спектра сигнала. В дальнейшем в направленном режиме азимутальный канал использовал импульсный сигнал и специальное устройство обработки в бортовом радиоприемном устройстве. Это положительно сказалось на точности в условиях отражений от местных предметов, особенно для моделей радиомаяков, имеющих достаточно широкую диаграмму направленности азимутальной антенны.

Для реализации оборудования РСБН был выбран рабочий диапазон частот 1000 МГц (длина волны 30 см). Это наиболее удобный диапазон волн, где можно было создавать антенны с узкой диаграммой направленности при сравнительно небольших размерах.

Дальномер РСБН использует принцип вторичной радиолокации «запрос — ответ». Канал радиодальномера РСБН содержит бортовой передатчик, излучающий импульсы длительностью порядка 1,5 мкс. Эти импульсы принимаются приемником наземного радиомаяка, декодируются, задерживаются на величину фиксированной задержки, кодируются и модулируют передатчик. Ответные сигналы излучаются и принимаются на борту. Время прохождения сигналов от ЛА до наземного приемопередатчика и обратно определяет наклонную дальность до наземного радиомаяка с учетом поправки на время фиксированной задержки в радиомаяке.

4. Радиомаяки радиотехнических систем ближней навигации

4.1. Радиомаяк РСБН-2Н.

Радиомаяк РСБН-2Н («Свод») — первый радиомаяк системы РСБН. Совместно с бортовым оборудованием радиомаяк решал следующие задачи:

— обеспечение на борту ЛА его координат в виде азимута и дальности относительно точки установки радиомаяка;

— получение на индикаторе кругового обзора радиомаяка отметок от самолетов, работающих с данным радиомаяком. При работе с бортовым оборудованием РСБН радиомаяк обеспечивал следующие характеристики:

Зона обзора:

— по азимуту — 360° ;

— по углу места — 45° .

Дальность действия (зависит от высоты):

— на высоте 12000 м — 380 км;

— на высоте 5000 м — 250 км.

Точность измерения координат (2σ):

— по азимуту — $0,25^\circ$;

— по дальности — 200 м.+ 3% от дальности.

Число частотно-кодовых каналов — 40;

Пропускная способность:

— по азимуту — не ограничено;

— по дальности — 100 самолетов.

Конструктивно радиомаяк был выполнен на шасси автомашины КРАЗ.

Транспортировка радиомаяка могла осуществляться по шоссе и грунтовым дорогам своим ходом или по железной дороге.

Разработка радиомаяка производилась в период 1952—1956 гг.

Серийный выпуск — 1958—1967 гг.

Всего выпущено и передано в эксплуатацию 350 радиомаяков.

Радиомаяк РСБН-2Н является первым радиомаяком РСБН, поэтому коллектив разработчиков этого маяка, кроме работ, связанных непосредственно с созданием радиомаяка, провел большую работу по отработке принципов РСБН в целом. Вся работа по разработке РСБН, в том числе по разработке радиомаяка и бортового оборудования, проводилась под техническим и организационным руководством Г. А. Пахолкова.

4.2. Радиомаяк РСБН-4Н.

Радиомаяк-4Н («Дорога») разрабатывался для замены радиомаяка РСБН-2Н и при его создании основное внимание уделялось улучшению эксплуатационных характеристик. Радиомаяк РСБН-4Н имеет такие же характеристики, как и радиомаяк РСБН-2Н по зонам обзора, дальности действия, пропускной способности и отличается числом частотно-кодовых каналов, которое было доведено до 88.

Разработка радиомаяка производилась в период 1959—1963 гг.

Радиомаяк оказался очень удобным в эксплуатации и нашел широкое применение; его серийный выпуск производился около 30 лет (1965—1993 гг.). Всего выпущено и передано в эксплуатацию около 1500 радиомаяков и, начиная с середины 1970-х гг., практически вся ближняя навигация в Советском Союзе обеспечивалась радиомаяками РСБН-4Н.

За создание отечественной системы ближней радионавигации в 1964 г. коллектив разработчиков был удостоен Государственной премии I степени.

4.3. Радиомаяк РСБН-6Н.

В 1965 г. Всесоюзным НИИРА была начата разработка средств ближней навигации для самолетов и аэродромов местных воздушных линий (МВЛ) гражданской авиации. Бортовое оборудование разрабатывалось под шифром «Веер-АД», радиомаяк под шифром «Балка-АД», контрольно-проверочная аппаратура бортового оборудования — под шифром «Арфа».

В соответствии с назначением средства ближней навигации для МВЛ отличались следующими основными особенностями:

- меньшими габаритами, массой и энергопотреблением как бортового, так и наземного оборудования;
- меньшей стоимостью изготовления и эксплуатации.

Радиомаяк «Балка-АД» был предназначен для использования на аэродромах с невысокой плотностью воздушного движения.

Всего до 1977 г. Челябинским радиозаводом «Полет» было выпущено и установлено на аэродромах СССР 50 радиомаяков «Балка-АД», которым было присвоено название РСБН-6Н.

4.4. Радиомаяк РСБН-8Н.

Создание радиомаяка третьего поколения РСБН-8Н («Окружность») обусловлено, в первую очередь, необходимостью замены устаревших (морально и физически) радиомаяков РСБН и широкого внедрения в систему РСБН нового направленного режима работы. Азимутально-дальномерный радиомаяк (АДРМ) был разработан и прошел госиспытания в период 1980—1985 гг. Аппаратура создана с использованием новейшей элементной базы, схемно-технических, конструктивных и технологических решений, благодаря чему, в сравнении с РСБН-4Н, удалось уменьшить погрешность, вносимую АДРМ по каналу дальности, в 2 раза ($2\sigma = 100$ м, вместо $2\sigma = 200$ м для РСБН-4Н).

Основные характеристики АДРМ; режимы работы:

- всенаправленный, аналогичный РСБН-4Н;
- направленный, обеспечивающий зону обзора до 10000 м;
- 176 рабочих каналов;
- 200 ЛА, обслуживаемых по дальномерному каналу;
- погрешность, вносимая АДРМ по дальномерному каналу — 70 м.

В разработке АДРМ принимал участие НИИТ (г. Челябинск) — в части радиопередающих устройств.

4.5. Радиомаяк РСБН-10Н системы ближней радионавигации для управления беспилотными летательными аппаратами.

В конце 1950-х годов руководство Советского Союза приняло решение создать систему дальней беспилотной фото- и радиотехнической разведки под шифром «Ястреб». Ответственность за решение этой задачи возложили на ОКБ А. Н. Туполева.

В 1956 г. в ОКБ-156 Туполева было создано новое подразделение — «Отдел К», задачей которого была разработка беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) различного назначения. Постепенно это новое подразделение превратилось в полноценное конструкторское бюро. Его возглавил Андрей Николаевич Туполев.

Новый беспилотный самолет-разведчик получил по ОКБ обозначение «Ту-123».

Основными принципами обеспечения функционирования Ту-123 и последующих беспилотных самолетов-разведчиков были:

- обеспечение автономности базирования и применения БПЛА в условиях, неподготовленных в инженерном отношении;
- возможность перебазирования БПЛА и систем обеспечения своим ходом на расстояние до 500 км с сохранением боеспособности;
- создание систем автоматической проверки бортового оборудования.

В результате появился уникальный разведывательный комплекс, ставший прототипом для ракетопланов конструкции Туполева. Автономность базирования обеспечивалась запуском самолета со стартовой установки с использованием твердотопливных ускорителей. Спасаемая часть (носовая с приборным отсеком у Ту-123, в последующих разведсистемах — весь самолет) при возвращении самолета в район базирования приземлялась с помощью парашютной системы. На завершающем этапе полета самолет управлялся в ручном режиме по командам с земли с помощью бортовых и наземных радиотехнических средств. Над выбранным местом подавались команды на выключение маршевого двигателя, слив остатка топлива, перевод БПЛА в набор высоты для гашения скорости и выпуск тормозного парашюта.

На основании положительных результатов испытаний Ту-123 система дальней беспилотной фото- и радиоразведки «Ястреб» в 1964 г. была принята на вооружение советских ВВС. Серийное производство БПЛА Ту-123 и других элементов системы продолжалось до 1972 г. в Воронеже; всего было построено 52 экземпляра. Система состояла на вооружении разведывательных подразделений ВВС, до 1979 г. дислоцирующихся в западных приграничных военных округах.

В начале 1970-х годов ОКБ Туполева было поручено создание модернизированной системы фото- и телевизионной разведки театра военных действий под шифром «Стриж». Предполагалась разработка БПЛА проекта «143» (ближняя зона), «141» (фронт и тылы) и аппаратуры ретрансляции на базе самолета Ту-16. В 1972 г. во ВНИИРА поступило техническое задание на проведение ОКР «ЗИГЗАГ» по новому для института направлению — разработке комплекса средств управления БПЛА проектов «141», «143» и самолетом-ретранслятором.

За основу наземного оборудования был взят радиомаяк радиосистемы ближней навигации РСБН-8Н, модификация которого для аппаратуры «ЗИГЗАГ» получила наименование РСБН-10Н. Его дополнили кузовом управления ПОУ-2, формировавшим команды управления БПЛА. Для разработки бортовой аппаратуры «ЗИГЗАГ-143Б», «ЗИГЗАГ-141Б», «ЗИГЗАГ-Т» был создан комплексный отдел.

Опытные образцы аппаратуры были разработаны, изготовлены и в сжатые сроки прошли предварительные испытания.

В 1976, 1977 гг. в Ахтубинске проводились межведомственные и государственные испытания этого оборудования. Коллектив разработчиков оперативно вносил необходимые изменения в КД и дорабатывал опытные образцы. Разработчики проводили большую работу по стыковочным работам на Харьковском авиазаводе, выпускавшем БПЛА изделия «141» и по авторскому надзору в частях, оснащенных этими изделиями в городах Хмельницкий (Украина) и Мадона (Латвия). Большие, совместные с эксплуатирующими частями, испытания проведены были также на полигоне Балхаш в суровых условиях февральской зимы в степи.

Серийное производство БПЛА Ту-141 с навигационной аппаратурой ВНИИРА «ЗИГЗАГ-141Б» продолжалось в Харькове с 1978 до 1989 гг.; всего было построено 211 экземпляров. Другие элементы системы «Стриж» выпускалась серийно силами ВНИИРА. Всего систем «ЗИГЗАГ-Н» было выпущено 13 комплектов. Опытных изделий «143» с аппаратурой «ЗИГЗАГ-143Б» было построено силами ОКБ Туполева 6 комплектов.

4.6. Радиомаяк системы «Привод-СВ».

Азимутально-дальномерный радиомаяк (АДРМ) системы «Привод-СВ» размещался на авианесущих кораблях проекта 1143 и был предназначен для обеспечения полетов ЛА, базирующихся на корабле, и совместно с бортовым оборудованием РСБН решал следующие задачи:

— получение на борту ЛА информации о его местоположении относительно корабля в виде азимута и дальности;

— получение на корабле информации о местоположении ЛА, работающих с радиомаяком;

— обмен информацией между ЛА и кораблем по линиям автоматической передачи данных (АПД) РСБН.

АДРМ — первый радиомаяк РСБН, работающий в направленном режиме. Коллективу разработчиков этого маяка помимо собственной разработки аппаратуры пришлось провести большую работу по практической отработке и внедрению в эксплуатацию принципиально нового режима РСБН. Исследование принципов организации работы радиомаяка РСБН в направленном режиме выполнялись на кафедре радиосистем ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина), возглавляемой д. т. н., профессором Ю. М. Казариновым.

4.7. Упрощенный дальномерно-азимутальный радиомаяк.

Упрощенный дальномерно-азимутальный радиомаяк (УДАРМ) начал разрабатываться в начале 1970-х гг. как составная часть высокоомобильной посадочной группы «Поле-П». Задачей УДАРМ'а в составе посадочной группы «Поле-П» являлось обеспечение навигации ЛА в зоне аэродрома и ввод ЛА в зону действия посадочного радиомаяка. Для решения этих задач УДАРМ формирует и передает на борт ЛА сигналы, по которым с помощью бортового оборудования определяются азимут и дальность ЛА относительно места установки радиомаяка. Одним из основных требований, предъявляемых к УДАРМ'у, были требования по высокой мобильности: минимальные масса, габариты и время развертывания. Радиомаяк должен был переноситься силами одного-двух человек и развертываться на подготовленной площадке за 20—30 минут. Существовавшие в то время радиомаяки ближней навигации («Дорога», «Балка») имели массу несколько тонн и развертывались натренированной командой за 4—8 часов. Фактически ставилась задача разработки радиомаяка РСБН с массой, сниженной с нескольких тонн до 25 кг, с приемлемыми характеристиками по точности и зоне действия. Летные испытания макета показали возможность достижения поставленной цели. Радиомаяк УДАРМ обеспечивает работу на 20 частотно-кодовых рабочих каналах дециметрового диапазона. Зоны действия радиомаяка:

— в горизонтальной плоскости — 360°;

— в вертикальной плоскости — 0,8—17°.

Дальность действия для высоты полета 500 м — не менее 35 км, для высоты 3000 м — не менее 100 км.

Погрешность формирования координат для 95 % измерений не превышает:

- по азимуту — 5° ;
- по дальности — 250 м.

Пропускная способность азимутального канала не ограничена.

Пропускная способность дальномерного канала:

- в секторе 360° — 30 летательных аппаратов (ЛА);
- в секторе 36° — не более трех ЛА.

Электропитание радиомаяка обеспечивается от аэродромной однофазной сети 220 В, 50 Гц.

Потребляемая мощность от сети не превышает 150 Вт.

Общая масса радиомаяка не превышает 36 кг.

Габаритные размеры радиомаяка в развернутом положении:

- длина — 1680 мм;
- ширина — 1680 мм;
- высота — 1600 мм.

Испытания показали возможность использования радиомаяка в самых разных условиях. Одновременно была проверена возможность использования УДАРМ'а в качестве средства инструментальной посадки по методике «неточного захода». В отчетах по данным исследованиям приводятся материалы и отзывы летчиков-испытателей, свидетельствующие о том, что использование УДАРМ'а в качестве посадочного средства значительно облегчает заход на посадку и может обеспечить заход на посадку до высоты 80—100 м.

Радиомаяк показал высокую расчетную надежность работы на отказ, которая составляла 4500 ч. Опыт разработки УДАРМ'а показал возможность достижения разумного компромисса между противоречивыми требованиями по высоким техническим характеристикам и возможностью создания надежного, малогабаритного и очень дешевого навигационного и посадочного оборудования.

5. Бортовая аппаратура системы ближней радионавигации

5.1. Бортовая аппаратура РСБН первого поколения.

Одновременно с разработкой наземного радиомаяка РСБН-2Н («Свод») разрабатывалось бортовое оборудование отечественной азимутально-дальномерной аппаратуры ближней радионавигации РСБН 2С.

Бортовое оборудование РСБН-2С при работе с наземными радиомаяками позволяло решать следующие задачи:

- непрерывно измерять текущие значения координат самолета относительно наземного радиомаяка;
- обеспечивать полеты по программируемым траекториям «на и от» радиомаяка по прямой, проходящей через радиомаяк, полет по задан-

ной орбите и по любому линейно-ломаному маршруту, не проходящему через радиомаяк;

— приводить ЛА в любую заданную точку маршрута с указанием момента ее пролета;

— формировать сигналы для индикации местоположения ЛА на индикаторах воздушной обстановки наземных радиомаяков и обеспечивать опознавание ЛА по запросу с земли;

— выполнять инструментальный заход на посадку при работе с посадочной радиомаячной группой (ПРМГ), включающей наземные курсоглиссадные радиомаяки и ретранслятор дальномеров.

С самого начала своего зарождения система РСБН являлась комплексной системой навигации и посадки ЛА и обеспечивала так называемый ныне режим «зональной навигации» за счет использования в составе бортовой аппаратуры счетно-решающего прибора с блоком управления.

В бортовой аппаратуре РСБН-2С предусматривалось совместное с системами СП-50 и «Курс-М» использование пилотажных приборов КППМ для индикации отклонений от заданной траектории в режиме навигации, от линий курса и глиссады при заходе на посадку.

Вместе с тем, в аппаратуре РСБН-2С не предусматривалась возможность ее сопряжения с другими бортовыми навигационными средствами и системами с целью обеспечения комплексной обработки навигационной информации. Такая возможность появилась в последующих модификациях бортовой аппаратуры.

В качестве элементной базы в РСБН-2С использовались электровакуумные и металлокерамические радиолампы, навесной радиомонтаж, электромеханические устройства, сельсины, реле, объемные коаксиальные СВЧ-резонаторы для высокочастотных усилительных устройств и умножителей частоты, ламповые стабилизаторы напряжения.

Бортовая аппаратура РСБН-2С была реализована в виде набора блоков, в том числе:

1. Самолетного приемника азимута и дальности (СПАД-2).
2. Самолетного запросчика дальномеров (СЗД).
3. Блока измерения азимута (БИА).
4. Блока измерения дальности (БД).
5. Счетно-решающего прибора (СРП).
6. Пульта управления штурмана и пилота.
7. Прямопоказывающих приборов азимута и дальности для пилота и штурмана и командно-пилотажных приборов (КППП) для полетов по заданным траекториям и инструментального захода на посадку.
8. Блоков связи с бортовой аппаратурой СП-50 и «Курс-М».

9. Планшета со сменяемой географической картой и самописцем, фиксирующим траекторию полета ЛА.

10. Бортовых приемо-передающих антенн.

Бортовое оборудование РСБН-2С было установлено на подавляющем большинстве существующих в то время самолетов ВВС, ПВО и МГА. Казанский радиозавод выпустил в общей сложности 10635 комплектов этой аппаратуры.

За создание уникальной отечественной системы ближней радионавигации в 1967 г. коллектив разработчиков был удостоен Государственной премии I степени.

Дальнейшее развитие бортового оборудования РСБН связано с реализацией таких возможностей, как:

- использование бортовых вычислительных устройств, их сопряжение с радиотехническими системами навигации и автономными бортовыми средствами для комплексной обработки навигационной информации;

- реализация взаимодействия самолетов в воздухе для обеспечения встречи для дозаправки, сбора групп и выполнения полета строем на базе бортовой аппаратуры системы межсамолетной навигации, определяющей взаимные координаты летательных аппаратов;

- сопряжение бортового оборудования с системами автоматического и директорного управления для обеспечения режимов автоматической и полуавтоматической посадки ЛА, особенно ЛА истребительной и фронтовой авиации;

- использование радиоканалов навигационной системы РСБН для АПД и оперативной информации по линиям «земля — борт» и «борт — земля».

Указанные выше возможности были реализованы в последующих поколениях бортового оборудования РСБН, в которых использовались новая элементная база и технологии, позволившие добиться существенного уменьшения весов, габаритов, энергопотребления, повышения надежности, точности измерений и помехозащищенности аппаратуры.

5.2. Модификации бортовой аппаратуры РСБН первого поколения.

Одной из первых модификаций бортовой аппаратуры РСБН явилась бортовая аппаратура РСБН 2СВ («Свод-Встреча»), разработанная на базе РСБН-2С. Кроме задач навигации и посадки это оборудование имело режим межсамолетной навигации для обеспечения встречи самолетов над безориентирной местностью и для сбора группы самолетов. Аппаратура РСБН-2СВ позволяла проводить взаимные измерения дальности между

двумя ЛА или определять удаление ведомых ЛА до ведущего ЛА. Кроме того, за счет наличия на каждом ЛА радиополукомпаса определялись взаимные направления ЛА друг на друга. Работа оборудования РСБН-2СВ в режиме межсамолетной навигации выполнялась автономно без участия наземных средств.

Бортовая аппаратура РСБН-2СВ была размещена на самолетах МЗ и М4 авиаконструктора В. М. Мясищева и в 1960—1962 гг. прошла летные испытания на базе аэродрома в районе г. Энгельс Саратовской области.

Создание аппаратуры РСБН-2СВ положило начало новому направлению работ во ВНИИРА — направлению межсамолетной навигации и взаимного измерения координат ЛА, которое интенсивно развивалось на протяжении длительного периода времени.

В начале 1960-х гг. была разработана новая модификация бортовой аппаратуры РСБН-2СА, которая обеспечивала сопряжение с автономными средствами навигации с помощью навигационного аналогового вычислительного устройства (НВУ-Б). В этом варианте аппаратуры сопряжение радиотехнических и автономных средств представляло собой уже не просто обеспечение динамической памяти измеренных радиоданных, а комплексную обработку информации с фильтрацией и коррекцией данных.

Создание аппаратуры РСБН-2СА положило начало еще одному новому направлению работ во ВНИИРА, которое получило широкое распространение в современных бортовых пилотажно-навигационных комплексах. Аппаратура РСБН-2СА устанавливалась на самолеты Ту-154 и Ту-28. Казанский радиозавод изготовил 910 комплектов этой аппаратуры.

Промежуточными между первым и вторым поколениями аппаратуры РСБН явились аппаратура «Искра», «Ромб-1», РСБН-П и РСБН-154.

Аппаратура «Искра» предназначалась для установки на самолеты фронтовой авиации.

Аппаратура «Ромб-1» дополнительно включала аналоговые вычислительные устройства навигации и посадки, позволяющие осуществлять маршрутный полет по заданным траекториям, возврат на свой аэродром и заход на посадку в автоматическом и директорном режимах, для чего была сопряжена с САУ бортового навигационно-пилотажного комплекса. Эта аппаратура устанавливалась на самолетах истребительной авиации и ПВО. В ней использовались приемо-передающие устройства (СПАД-2 и СЗД) из аппаратуры РСБН-2С и вновь разработанные цифровые измерительные устройства.

Аппаратура РСБН-П предназначалась для установки в составе комплекса «Полет-1Т» на гражданские и военно-транспортные самолеты (Ил-62, Ил-76, Ан-22). В составе комплекса «Полет-1Т» аппаратура РСБН-П

была сопряжена с аналоговым бортовым навигационным вычислителем и системой автоматического управления САУ-1Т.

Промежуточным вариантом явилась и бортовая аппаратура РСБН-154, входящая в состав навигационно-пилотажного комплекса самолета Ту-154, также сопряженная с аналоговым бортовым вычислителем НВУ-3Б и САУ.

5.3. Второе поколение бортовой аппаратуры РСБН

Дальнейшим развитием бортовой аппаратуры была аппаратура второго поколения: РСБН-5С («Искра-К»), РСБН-6С («Ромб-1К») и РСБН-7С.

Второе поколение бортового оборудования было разработано для различных типов самолетов на базе унифицированных блоков аппаратуры «Канал».

На основе аппаратуры РСБН-5С был создан комплекс «Полет-ОИ», в котором обеспечивалось сопряжение с датчиками воздушной скорости, высоты и курса и системой автоматического управления самолетом (САУ).

Аппаратура РСБН-6С имела в своем составе аналоговые навигационный и посадочный вычислители, что позволяло создать навигационно-посадочный комплекс самолетов «Полет-1И» с использованием автономных средств и осуществлять автоматизированные полеты по маршруту, возврат и заход на аэродром посадки или на запасные аэродромы. Это было реализовано с помощью блоков аналоговых вычислительных устройств БВН (навигации) и БВП.

Аппаратура РСБН-6С и ее дальнейшее развитие — РСБН-10С, А-321 установлены на самолетах МиГ-25П, МиГ-25РБ, МиГ-23 и МиГ-27 ОКБ им. А. И. Микояна и самолетах Су-17М, Су-24, Су-25 ОКБ им. П. О. Сухого.

Аппаратура РСБН-7С была предназначена для установки на самолеты Ил-62, Ан-22 и Ил-76 в составе комплексов «Полет-1Т» и «Купол-76».

В связи с необходимостью обеспечения повышенной надежности при заходе на посадку и посадке этих тяжелых самолетов устанавливались двоярные приемные устройства системы РСБН.

Аппаратура РСБН-7С была сопряжена с аналоговыми бортовым вычислительным устройством, осуществляющим коррекцию счисленных координат ЛА, и системой автоматического управления.

С использованием комплекса «Полет-1Т» был впервые осуществлен автоматический заход на посадку до высоты 40—50 м.

Приемники и передатчик системы РСБН-7С, а также самолетный ответчик работали с комплексной антенно-фидерной системой (АФС) «Пион-НП». Аппаратура серийно выпускалась Казанским заводом «Радиоприбор».

Аппаратура РСБН-ПКВ, созданная на базе аппаратуры РСБН 7С ОКБ Казанского радиозавода, позволила решить задачи встречи для дозаправки топливом над безориентирной местностью аналогично аппаратуре РСБН-2СВ. РСБН-ПКВ устанавливалась на самолеты Ту-22, Ту-22М, для которых была разработана АФС «Пион-ПВК».

Основные характеристики аппаратуры второго поколения остались без изменений, но использование в бортовой аппаратуре новой элементной базы (полупроводников, микромодулей) дало возможность снизить вес аппаратуры, ее энергопотребление и повысить надежность.

Для пилотажно-навигационного комплекса самолета Ту-144 была разработана аппаратура РСБН-144, включающая вдвоенный комплект аппаратуры РСБН 7С, комплексный пульт управления радиотехническими средствами (РСБН, «Курс-МП», СД 67 и ответчиком) и аналоговый навигационно-посадочный вычислитель дублирующего комплекса ВНПК-144.

С начала 1960-х гг. для оборудования самолетов ВВС, ПВО и ВТА стали разрабатываться навигационно-посадочные комплексы, что позволило заранее производить увязку всей входящей аппаратуры. Первым комплексом, предназначенным для всех типов самолетов, являлся комплекс «Полет». Этот комплекс для разных типов летательных аппаратов имел отдельные модификации: для легких летательных аппаратов использовался комплекс «Полет-1И», а для самолетов МГА и ВТА — комплекс «Полет-1Т».

Если вначале бортовая аппаратура РСБН использовалась на борту ЛА как самостоятельное оборудование, не связанное с другой аппаратурой и системами, то в дальнейшем вся аппаратура, разрабатываемая в институте, создавалась с учетом использования в конкретных самолетных комплексах.

На основе системы «Полет-1Т» была разработана система «Полоса-18». В этой системе использовалось сопряжение радиотехнических посадочных средств с автономными средствами, что позволило осуществлять посадку самолета-лаборатории Ил-18 до полного приземления по категории метеоминимума III.

Система «Полоса-18» включала в себя комплекс «Полет-1Т», баро-радиоинерциальный измеритель БРНИК и дублированный радиовысотмер малых высот. Летные испытания системы были закончены в мае 1967 г. В процессе летных испытаний было выполнено 400 автоматических заходов на посадку, проведено 295 автоматических посадок.

5.4. Третье поколение бортовой аппаратуры РСБН.

К третьему поколению бортовой аппаратуры РСБН относится аппаратура «Радикал» (А 312).

Аппаратура А-312 в навигационном диапазоне работала на 176 частотно-кодовых каналах, в том числе 88 из них были предназначены для работы в принципиально новом направленном режиме, позволяющем повысить помехозащищенность и дальность действия системы. Точностные характеристики аппаратуры были сохранены на уровне аппаратуры предыдущих поколений, однако использование новейшей на то время элементной базы (микросхемы, модули на тонкопленочной технологии) с применением технологических решений и полностью исключением контактных переключающих устройство позволило существенно снизить габаритно-массовые характеристики аппаратуры, ее энергопотребление и повысить надежность.

Впервые в аппаратуре ближней навигации и посадки был осуществлен полный встроенный контроль, позволяющий определить неисправность аппаратуры с точностью до сменного блока, проводить предполетную и послеполетную подготовку ЛА без применения КПА, и реализована возможность автоматического выбора канала в полете от бортовой ЦВМ (БЦВМ).

Все связи с БЦВМ осуществлялись в цифровом виде.

Выбор режимов работы аппаратуры и частотно-кодовых каналов при полете по маршруту и заходе на посадку мог производиться автоматически от БЦВМ или вручную с пульта управления.

Аппаратура «Радикал» (А-312) была разработана в нескольких вариантах для различных комплексов целого ряда самолетов.

Аппаратура А-312-10 решала чисто навигационно-посадочные задачи и устанавливалась на самолеты истребительной авиации и ПВО.

Аппаратура А-312-07 была разработана для комплекса БПК-2П самолета Ил-86, включала в себя сдвоенный приемник и работала с АФС «Пион-НП86». Эта аппаратура также устанавливалась на самолет А-40.

Аппаратура А-312-05 была создана на базе аппаратуры А-312-07 для самолета Ан-124.

Аппаратура А-312-СМ была создана для обеспечения посадки при работе с мобильным курсоглиссадным радиомаяком двухсантиметрового диапазона волн «Поле П».

Кроме чисто навигационных и посадочных задач аппаратура А-312 совместно с АФС «Поток-НКР» в режиме межсамолетной навигации решала сложную задачу определения взаимных координат между ЛА в группе из четырех взаимодействующих самолетов. При этом выполнялось измерение пеленгов и дальностей между ЛА группы, которые выдавались в БЦВМ. Порядок работы мог задаваться как вычислительной машиной, так и вручную с пультов управления.

По существу на базе аппаратуры А-312 и АФС был осуществлен режим радиоконюаса в дециметровом диапазоне волн. Аппаратура успешно прошла испытания на самолете МиГ-31.

На базе высокочастотных блоков аппаратуры А-312 (моноблок А-312-40) и специальных блоков кодирования/декодирования для комплекса РНП-01 самолета МиГ-31 была создана аппаратура передачи данных АПД-518. Эта аппаратура обеспечивала обмен полетной информацией, выдаваемой аппаратурой БЦВМ А-313 и другими датчиками в процессе полета группы ЛА между взаимодействующими в группе ЛА по общей циклограмме с аппаратурой определения взаимных координат А-312-09, которая задавалась БЦВМ.

Одновременно с разработкой аппаратуры РСБН 3-го поколения А-312 во ВНИИРА проводилась разработка навигационно-пилотажного цифрового вычислителя А-313 («Маневр-В»).

Аппаратура А-313 во взаимодействии с аппаратурой А-312 и автономными навигационными системами позволяла осуществлять полет по любому запрограммированному прямолинейному и ломаному маршруту, заход на посадку на запрограммированные аэродромы или выполнять возврат на аэродром вылета. Предусматривалось оперативное перепрограммирование маршрута в процессе полета. А-313 сопрягалась с системами директорного и автоматического управления самолетом. Аппаратура была выполнена с использованием микросхем средней степени интеграции и многослойных печатных плат.

Аппаратура А-313 в составе комплекса РНП-01 устанавливалась на самолет МиГ-31, а в дальнейшем, совместно с аппаратурой А-317 («Урон») — на самолет Су-27. Аппаратура А-312 и А-313 серийно выпускалась Казанским заводом «Радиоприбор».

Для использования на самолетах местных воздушных линий и вертолетах была выполнена разработка бортовой азимутально-дальномерной аппаратуры «Веер-А», «Веер-АД» и «Веер-М» (А-320). Аппаратура была размещена на самолетах Як-42 и Ан-72. На базе аппаратуры «Веер-М» с добавлением специализированного аналогового вычислителя была создана аппаратура навигации и посадки для ЛА корабельного базирования «Квадрат-М». Аппаратура была размещена на самолете с вертикальным взлетом и посадкой Як-38. Серийное изготовление аппаратуры проводилось на Хмельницком радиотехническом заводе.

Аппаратура «Урон» (А-317) предназначена для решения задач ближней навигации, посадки, сбора группы и встречи самолетов в воздухе для дозаправки топливом. Аппаратура совместно с БЦВМ «Маневр-В»

устанавливалась на самолетах Су-27. Серийно выпускал аппаратуру «Урон» Казанский завод «Радиоприбор». Для самолета Ту-160 была разработана специальная комплектация аппаратуры встречи для дозаправки самолетов в воздухе А-312-23.

Для самолета МиГ-29 была разработана аппаратура БРНО-29, созданная на базе высокочастотных блоков аппаратуры «Радикал» (А-312) и специализированного цифрового бортового вычислителя ВЦ, позволяющая решать навигационные и посадочные задачи.

В 1970 г. была задана разработка бортовых навигационных комплексов БНК-1П для самолетов Як-42 и Ан-72 и БНК-2П для самолета Ил-86.

В 1974 г. была начата разработка комплекса РНП-01 для самолета МиГ-31.

В 1986 г. была начата разработка бортовых комплексов навигационно-посадочного оборудования с цифровыми связями под названием КСЦПО для самолетов Ил-96-300 и Ту-204. Это оборудование впервые в стране реализовано в виде интегральной модульной авионики (ИМА) на отечественных 16 разрядных КМОП микропроцессорах серии 588 НПО «Интеграл» г. Минск. Набор функционально-конструктивных модулей (ФКМ) включал одноплатные микро-ЭВМ и микропроцессорные измерители: РСБН/ПРМГ, DME, ILS, VOR, MLS. Оборудование выполняло роль датчика навигационной и посадочной информации, которая использовалась в вычислительной системе управления полетом, вычислительной системе управления посадкой (ВСУП), системе электронной индикации (СЭИ) и в системе сбора и сигнализации отказов.

Самолет Ил-96-300 с комплексом КСЦПО прошел государственные испытания, сертифицирован и приступил к пассажирским перевозкам в 1993 г., самолет Ту-204 после государственных испытаний и сертификации приступил к пассажирским перевозкам в первом полугодии 1994 г. Аналогичная аппаратура устанавливается в комплексах ЦНПК-114 самолета Ил-114 и на самолете Ту-334.

В качестве промежуточного поколения между третьим и четвертым поколениями аппаратуры РСБН была разработана аппаратура «Клистрон» (А-321), «Скорость» (А-324).

Эта аппаратура была разработана на базе высокочастотных устройств аппаратуры А-312 с применением специально разработанных процессоров для выполнения как функций обработки азимутально-дальномерной и курсоглиссадной информации, так и решения навигационных задач выполнения полетов по маршруту, возврата на аэродром посадки и захода на посадку.

Аппаратура промежуточного поколения А-331 была создана на основе специализированной цифровой вычислительной машины (СЦВМ) IV поколения, реализованной на микро-ЭВМ и высокочастотных блоков А-312 III поколения. Аппаратура А-331-05 была предназначена для установки на самолеты Ил-96-300 и Ту-204 в составе бортовых комплексов КСЦПО.

5.5. Четвертое поколение бортовой аппаратуры РСБН.

В качестве бортовой аппаратуры четвертого поколения РСБН планировалась разработка аппаратуры «Окружность» в составе:

- навигационно-посадочной аппаратуры — А-314;
- аппаратуры определения взаимных координат — А-315.

Однако, несмотря на то, что была выполнена разработка аппаратуры и изготовлено шесть комплектов опытных образцов, разработка аппаратуры А-315 была прекращена.

К четвертому поколению бортовой аппаратуры РСБН относится бортовая аппаратура РСБН 85.

РСБН-85 предназначалась для использования в составе бортовых пилотажно-навигационных комплексов новых отечественных самолетов Ил-96-300, Ту-204, Ил-114, Ту-334. К этим комплексам были предъявлены специфические требования в части соответствия спецификациям международных стандартов. В аппаратуре предусматривалась реализация цифровых электрических связей с другими системами, датчиками и потребителями информации.

Вместе с тем, учитывая возможность использования аппаратуры РСБН-85 на самолетах ВВС, ПВО и ВМФ, было сохранено обеспечение связей в соответствии с требованиями отечественных ГОСТов.

В аппаратуре использованы современные технологии и элементная база, в том числе микропроцессоры и микросхемы большой степени интеграции (БИС), полосковые элементы, СВЧ-преселекторы на железоиттриевом гранате, микросхемы частного применения, устройства, выполненные на базе толсто пленочной технологии. Это позволило реализовать аппаратуру четвертого поколения РСБН-85, включая низкочастотные и высокочастотные модули, с массогабаритными характеристиками в 8—10 раз меньше по сравнению с аппаратурой первого поколения РСБН-2С.

Аппаратура РСБН-85 прошла межведомственные испытания, в процессе которых были подтверждены заданные тактико-технические требования.

В начале 1990-х гг. в связи с общей негативной обстановкой, возникшей в авиационной промышленности РФ, что непосредственно сказа-

лось на коллективе исполнителей, разработка, размещение и производственное освоение аппаратуры РСБН-85 были остановлены.

Высокий уровень организации работ по созданию бортовой аппаратуры практически в замкнутом технологическом цикле, начиная с разработки отдельных элементов и кончая комплексом аппаратуры в целом, позволили не только возобновить работы по аппаратуре РСБН-85, но и расширить возможности ее использования.

В короткие сроки, благодаря слаженной работе аппарата главного конструктора и коллектива исполнителей, была откорректирована КД, которой была присвоена литера О1. По дополнительным ТЗ были разработаны модификации аппаратуры РСБН-85 для военной авиации. Были проведены типовые испытания аппаратуры РСБН-85 различных комплектаций и произведены поставки аппаратуры РСБН-85 на самолеты ГА и ВВС, находящиеся на испытаниях и в эксплуатации: Ту-334, Ту-204, Ту-214, Ил-96-300, Су-80, Су-25СМТ, МиГ АТ, Ан-148, Ан-70, Як-130, Бе-200 и вертолет Ка-32.

В 2001 г. были проведены квалификационные испытания аппаратуры РСБН-85. В 2005 г. проведены повторные межведомственные испытания. Аппаратура РСБН-85 выдержала испытания на соответствие ТЗ и ОТТ ВВС и рекомендована для установки на объектах ВВС и ГА. Эта аппаратура вошла в состав комплексов А-380-МК и А-380-МС, предназначенных для корабельной авиации (вертолетов Ка-31 и самолетов МиГ-29К), а также комплексов ОПРНК на самолетах МиГ-29СМТ.

5.6. Пятое поколение бортовой аппаратуры РСБН.

В 2003 г. начата разработка промежуточного поколения IV-V бортовой аппаратуры РСБН-85В. Дополнительно к традиционным задачам навигации по РСБН и посадки по ПРМГ в аппаратуре решаются несколько специальных задач:

- определение взаимных координат в группе до 12 ЛА;
- решение задачи встречи для дозаправки топливом;
- информационный обмен в группе;
- информационный обмен по каналам «земля — борт» и «борт — земля».

Аппаратура РСБН-85В соответствует уровню современной аналогичной зарубежной бортовой аппаратуры по массо-габаритным характеристикам и надежности. Аппаратура РСБН-85В выполнена таким образом, что полностью взаимозаменяема с ранее разработанной аппаратурой РСБН-85.

В основу разработки аппаратуры РСБН-85В положены следующие задачи:

- навигация по радиомаякам РСБН;
- посадка по радиомаякам ПРМГ;
- обзор, определение взаимных координат в группе ЛА;
- встреча для дозаправки в воздухе;
- информационный обмен.

Аппаратура РСБН-85В размещена на самолетах Су-35 и Як-130. Для самолета Як-130 разрабатывается специальная комплектация аппаратуры РСБН-85В-130. Аппаратура РСБН-85В предназначена также для замены бортовой аппаратуры РСБН при проведении работ по модернизации ЛА, находящихся в эксплуатации.

С 2005 г. ведется разработка пятого поколения бортовой аппаратуры РСБН ОВК-2000. Работа проводится в соответствии с программой создания многофункционального ЛА пятого поколения.

Аппаратура РСБН-ОВК-2000 предназначена для решения задач военной авиации:

- навигации по радиомаякам РСБН, DME, TACAN, VOR;
- посадки по радиомаякам ПРМГ, ILS(Маркер), MLS;
- посадки по системе СРНС в режиме GLS;
- обзора, определение взаимных координат в группе;
- встречи для дозаправки в воздухе;
- обеспечения работы с корабельными системами навигации АДРМ и посадки MLS, ПРМГ и ПРЛК с АЛПСУ или ЦЛПСУ;
- информационного обмена.

Целью работы является создание нового поколения малогабаритной интегрированной бортовой многофункциональной аппаратуры, обеспечивающей решение задач навигации и посадки при работе в навигационном поле соответствующих отечественных и международных радиотехнических систем, а также для решения специальных задач корабельной авиации и межсамолетной навигации.

6. Имитаторы навигационно-посадочного оборудования, бортовые антенно-фидерные системы и бортовые пилотажно-навигационные системы управления самолетом

6.1. Имитаторы навигационно-посадочного оборудования.

Разработка имитаторов, предназначенных для имитации функций бортового оборудования в процессе отработки пилотажно-навигационных комплексов и в составе тренажеров (шифр «Купол»), началась во ВНИИРА в 1961 г. Эти приборы создавали совместно разработчики отдельных блоков и сотрудники отдела контрольно-измерительной аппаратуры. В период с

1961 по 1993 гг. разработано 4 поколения имитаторов. Это имитаторы аппаратуры РСБН различной модификации, аппаратуры «Ось-1», «Курс МП-2», «Курс МП-70», СД-75, СДК-85, и др. Имитаторы «Купол» входят в состав авиационных тренажеров практически всех летательных аппаратов гражданской и военной авиации нашей страны.

Все «Купола» изготавливались серийно заводом ВНИИРА, часть из них поставлялась на экспорт. Первое поколение «Куполов» — это аналоговая аппаратура, основа элементной базы — электровакуумные лампы. Имитаторы второго поколения разработаны в 1976—1980 гг. Это была уже цифро-аналоговая техника, выполненная на основе полупроводниковых приборов и микросхем. Это позволило отказаться от громоздких шкафных конструкций. На порядок повысились точностные характеристики, возросла надежность. Объем и масса изделий уменьшились в 7—8 раз, потребляемая мощность — в 2—3 раза.

С 1982 г. разрабатывались имитаторы четвертого поколения к тренажерам самолетов нового поколения: Ил-96-300, Ту-204, Ил-114.

Для вновь созданной аппаратуры передачи данных был разработан имитатор «Купол-518», используемый в составе тренажера для самолета МиГ-31.

6.2. Бортовые антенно-фидерные системы.

В конце 1950-х гг. совпало несколько событий, которые, на первый взгляд, вроде бы были не очень связаны, но именно их совпадение открыло перспективы нового направления в развитии антенно-фидерных систем аппаратуры радионавигации и посадки летательных аппаратов. С одной стороны, заканчивался этап разработки системы ближней навигации и посадки самолетов, которая получила наименование РСБН. С другой стороны, советское правительство значительно расширило финансирование по проектированию пассажирских самолетов. ОКБ А. Н. Туполева представило на летные испытания самолет Ту-114 (название «Россия») и первые реактивные пассажирские машины Ту-104, Ту-110 и Ту-124. ОКБ С. В. Ильюшина — турбовинтовой Ил 18 (который назывался «Москва») и следом — Ил-62. ОКБ О. К. Антонова — пассажирские Ан-10 («Украина») и транспортные Ан-12 и Ан-22.

В то время основными машинами в «Аэрофлоте» были Ил-12 и Ил-14, на которых из Москвы на Дальний Восток путешествие длилось с двумя ночевками. А новые аэропланы готовы были сократить его до нескольких часов.

В НИИ-33 была разработана антенно-фидерная система на базе полосковой СВЧ техники для ответчика СОД-57М (шифр «Листок»). Была

разработана система полосковых фильтров, новые перестраиваемые резонаторные антенны системы РСБН-2С, которые получили наименование ДРД-1В, ДРД-2В и ДРД-3В, обеспечившие все режимы приема и передачи, в том числе и режим «встреча». Именно эти системы и были внедрены в серийное производство на Казанском заводе «Радиоприбор» в комплекте аппаратуры РСБН-2С.

Министерствами радио- и авиапромышленности и самолетостроительными ОКБ была поддержана инициатива НИИ-33, касающаяся разработки комплексной АФС для аппаратуры ближней навигации, посадки, ответчиков УВД и опознавания. Коллективу НИИ предлагалось к концу 1961 г. предъявить на Государственные лабораторные испытания ряд комплектов АФС для различных типов самолетов (по одному для каждого самолетного ОКБ: Ту-22, Ил-18, Ан-12, МиГ-21, Су-9, Бе-12, Як-28).

В 1963 г. первые системы «Пион-В» для самолета Ту-22 и «Пион-НВ» для Ту-16 успешно прошли госиспытания и были приняты на вооружение. Системы обеспечивали также режим «Встреча» с целью дозаправки. В последующие годы были закончены модификации комплексных АФС для самолетов: «Пион-2П» (самолет Ан-22), «Пион-3П» (самолет МиГ-25), «Пион-П-144» (самолет Ту-144), «Пион-НП-86» (самолет Ил-86), «Пион-НП-62» (самолет Ил-62) и многие другие.

6.3. Бортовые пилотажно-навигационные системы управления самолетом.

Во второй половине 1950-х гг. во НИИ-33 началась разработка Единой Государственной системы управления воздушным движением, близкой по своим задачам к американской системе «Волскен».

В состав этой системы входила бортовая аппаратура полуавтоматического управления самолетом «Барометр-борт», которая позволяла производить полуавтоматическое вождение самолета в директорном режиме по командным стрелкам пилотажно-навигационного прибора (ПНП). Управление самолетом могло проводиться в режимах полета по маршруту, при заходе на посадку и посадке с использованием информации от радиотехнических средств дальней, ближней навигации (РСДН, РСБН) и систем посадки (СП-50) на базе специально разработанного для этой системы аналоговых вычислительного устройства. Для формирования сигналов управления использовалась информация от бортовых автономных средств, в том числе данных о курсе, крене, тангаже, вертикальной и воздушной скорости. Впервые в НИИ-33 был создан комплекс математического и полунатурного моделирования на базе интегратора постоянного тока типа ИПТ-5,

а затем на более «современных» аналоговых вычислительных устройствах ИПТ-9 и МН-8.

В состав комплекса полунатурного моделирования была включена реальная бортовая аппаратура с имитаторами наземных и бортовых систем, управляемых от вычислительной машины, центральная гировертикаль и курсовая система, установленные на управляемой одностепенной платформе, и кресло пилота со штурвалом управления, приборами ПНП, также связанными с вычислительной машиной.

Разработанный для формирования сигналов управления блок счетно-решающего устройства был выполнен с использованием электровакуумных приборов (пальчиковые лампы) и электромеханических элементов. Математическое и полунатурное моделирование и отработка системы в целом производилась с использованием реальных тактико-технических характеристик самолетов Ту-16 и МиГ-19. Были отработаны маршрутные полеты по сигналам отклонений от заданных траекторий и заходы на посадку. Управление производилось оператором с помощью штурвала по показаниям приборов ПНП.

Летные испытания системы производились на самолетах Ил-14, Ил-18 и Ту-104. Для обеспечения лабораторных и летных испытаний была разработана и внедрена система регистрации всех полетных параметров, позволяющая проводить оперативную расшифровку результатов и корректировку программ. Аппаратура успешно прошла Государственные лабораторные и летные испытания в ГНИКИ ВВС на самолетах Ил-14 и Ту 104.

На базе аппаратуры «Барометр» впервые в НИИ-33 был создан прообраз бортового пилотажно-навигационного комплекса самолета, что впоследствии нашло продолжение и развитие в работах по системе «Полет» и в других разработках.

Одновременно в рамках ОКР «Барометр» выполнялась разработка для использования в аппаратуре РСБН принципиально новых цифровых измерительных устройств азимута и дальности. Эти устройства были выполнены с использованием «этажерочных» микромодулей, устанавливаемых на печатных платах, что явилось первым шагом в создании перспективного направления по разработке высокоэффективных бортовых измерительных цифровых устройств.

Дальнейшим развитием работ по ОКР «Барометр-борт» явились работы по теме «Полоса». В этой аппаратуре были реализованы идеи о сопряжении автономных и радиотехнических средств на этапе захода на посадку для обеспечения бесперебойного формирования сигналов управления с учетом возможного пропадания радиотехнической информации в условиях наличия помех и искажений зон курса и глиссады за счет переизлучений от мест-

ных предметов. С этой целью аппаратура была сопряжена с бортовыми доплеровскими измерителями скорости и сноса (ДИСС).

Работы по теме «Барометр» явились основой для создания перспективных бортовых навигационно-пилотажных комплексов, которые начали разрабатываться с начала 1960-х гг. для оборудования самолетов ВВС, ПВО и ВТА, что позволило заранее производить увязку всей входящей в бортовые комплексы аппаратуры. Первым комплексом, предназначенным для всех типов самолетов, являлся комплекс «Полет». Этот комплекс для разных типов летательных аппаратов имел отдельные модификации. Для легких летательных аппаратов использовался комплекс «Полет-1И», а для самолетов МГА и ВТА комплекс «Полет-1Т».

В 1970 г. была задана разработка бортовых навигационных комплексов БНК-1П для самолетов Як-42 и Ан-72 и БНК-2П для самолета Ил-86. Впоследствии создавались бортовые комплексы для самолетов Ан-124, А-40, А-50 и др.

В 1986 г. была начата разработка бортовых комплексов навигационно-посадочного оборудования с цифровыми связями под названием КСЦПНО для самолетов Ил-96-300 и Ту-204.

Оборудование КСЦПНО обеспечивало функции датчиков навигационной и посадочной информации, которая использовалась в вычислительной системе управления полетом, вычислительной системе управления посадкой (ВСУП), системе электронной индикации (СЭИ) и в системе сбора и сигнализации отказов. Самолет Ил-96-300 с комплексом КСЦПНО прошел государственные испытания, сертифицирован и приступил к пассажирским перевозкам в 1993 г., самолет Ту-204 после государственных испытаний и сертификации приступил к пассажирским перевозкам в первом полугодии 1994 г.

Аналогичная аппаратура была использована для комплексов ЦНПК-114 самолетов Ил-114 и Ту 334.

5. Заключение

Работы, выполненные коллективом ученых и специалистов НИИ-33 — ВНИИРА, оказали существенное влияние на повышение эффективности и безопасности воздушного движения в СССР и Российской Федерации.

Анализ деятельности НИИ-33 — ВНИИРА в области создания радиотехнических систем ближней навигации демонстрирует использование специалистами ВНИИРА актуальных подходов к решению научно-технических задач, соответствующих технологическому уровню развития.

Методология «компендиум — таблица — инфографика» (КТИ) с использованием ленты времени (*timeline*), рис. 1, является важным инструментом снижения размерности контента и визуализации информации в историографии науки и техники.

Настоящей статьей в научный оборот введены новые сведения, касающиеся деятельности НИИ-33 — ВНИИРА в области создания радиотехнических систем ближней навигации.

Табл. 1. Общие параметры радиотехнических систем ближней навигации, разработанных в НИИ-33 — ВНИИРА.

Table 1. General parameters of short-range radio navigation systems developed at Research Institute 33 – VNIIRA

Название оборудования	Годы разработки	Серийный выпуск	К-во компл.
• Радиомаяки радиотехнических систем ближней навигации			
— Радиомаяк РСБН-2Н	1952—1956	1958—1967	350
— Радиомаяк РСБН-4Н	1959—1963	1965—1993	1561
— Радиомаяк РСБН-6Н	1965—1971	1972—1977	57
— Радиомаяк РСБН-8Н	1980—1985	н/д	н/д
— Радиомаяк РСБН-10Н	1972—1976	1978—1989	211
— Привод-СВ	н/д	н/д	н/д
— УДАРМ	1970—1972	н/д	н/д
• Бортовая аппаратура радиотехнических систем ближней навигации			
— 1-е поколение	1958—1960	н/д	910
— 2-е поколение	1963—1967	н/д	н/д
— 3-е поколение	1970—1974	1977	н/д
— 4-е поколение	1990—2004	2001	н/д
— 5-е поколение	2003—2005	н/д	н/д
• Имитаторы навигационно-посадочного оборудования			
— 1-е поколение	1961—1963	н/д	н/д
— 2-е поколение	1970—1980	н/д	н/д
— 3-е поколение	н/д	н/д	н/д
— 4-е поколение	1986—1993	н/д	н/д
• Бортовые антенно-фидерные системы	н/д	1961—?	н/д
• Бортовые пилотажно-навигационные системы управления самолетом			
— ОКР «Барометр»	1955—1970	н/д	н/д
— БНК-1П	1970—1974	н/д	н/д
— бортовые комплексы навигационно-посадочного оборудования с цифровыми связями (КСЦПНО)	1986—1990	1993	н/д

Примечание: «н/д» означает «нет данных».

Благодарности

Авторы статьи благодарят рецензента — доктора технических наук, профессора СПбГУ ГА Ю. Т. Криворучко за ряд ценных замечаний и уточнений.

Список литературы

1. Криворучко Ю. Т., Штраков Ю. Г. Создание микроволновой радиомаячной инструментальной системы посадки для высокоманевренных самолетов в СССР // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2024. Т. 7, № 4. С. 780—797.
2. Криворучко Ю. Т. 50 лет в строю Всесоюзного научно-исследовательского института радиоаппаратуры (ВНИИРА) // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2025. Т. 8, № 5. С. 835—860.
3. Ермолов П. П. Методология «компендиум — таблица — инфографика» (КТИ) в историографии науки и техники // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2025. Т. 8, № 1. С. 124—151.
4. НИИ-33 / ВНИИРА (рукопись). СПб., 2011. 377 с.

Сведения об авторах

Ермолов Павел Петрович, кандидат технических наук, доцент, профессор инженерного факультета Высшей технологической школы «Севастопольский приборостроительный институт» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID: 0000-0001-9089-974X.

Слѣзкин Геннадий Витальевич, старший преподаватель инженерного факультета Высшей технологической школы «Севастопольский приборостроительный институт» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация.

Катеринчук Виктор Иванович, аспирант инженерного факультета Высшей технологической школы «Севастопольский приборостроительный институт» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация.

Годы разработки радиотехнических систем ближней навигации в НИИ-33 – ВНИИРА

	1952	1955	1956	1959	1960	1961	1963	1965	1967	1970	1971	1972	1974	1976	1980	1982	1985	1986	1990	1993	2003	2004	2005
Радиомаяки		Радиомаяк 2Н		Радиомаяк 4Н		Радиомаяк 6Н (до 1971 г.)	УДАРМ	Радиомаяк 10Н	Радиомаяк 8Н														
Бортовая аппаратура			1-е поколение (с 1958 г.)		2-е поколение		3-е поколение												4-е поколение (до 2004 г.)				5-е поколение
Мшматоры ИПО				1-е поколение			2-е поколение									3-е поколение (продолжение)			4-е поколение				
Бортовые ИРС УС				ОКР «Барометр»			БНК-1П											КСЦНО					
	1952	1955	1956	1959	1960	1961	1963	1965	1967	1970	1971	1972	1974	1976	1980	1982	1985	1986	1990	1993	2003	2004	2005

Рис. 1. – Fig. 1.

History of the Development of Short-Range Radio Navigation Systems at Research Institute 33 – VNIIRA (1951–2005)

P. P. Yermolov, V. I. Katerinchuk, and G. V. Slyozkin

Sevastopol State University

33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation

ppyermolov@sevsu.ru

Received: February 14, 2026

Peer-reviewed: March 9, 2026

Accepted: March 9, 2026

Abstract: *This article presents the history of the development of short-range radio navigation systems at NII-33 – VNIIRA from 1951 to 2005. It examines the purpose of short-range radio navigation systems (SRN), the design principles of azimuth-rangefinder short-range radio navigation systems, the characteristics of ground equipment (RSN radio beacons), onboard RSN equipment, navigation and landing equipment simulators, onboard antenna-feeder systems, and onboard flight control and navigation systems. The results of this study are visualized using the “compendium–table–infographics” (CTI) methodology, based on three sequential levels of content transformation.*

Keywords: *Research Institute-33, All-Russian Research Institute of Radio Equipment (VNIIRA), short-range radio navigation systems, azimuth-range measuring system, radio beacons, navigation and landing equipment simulators, on-board antenna-feeder systems, on-board flight control and navigation systems for aircraft.*

For citation (IEEE): P. P. Yermolov, V. I. Katerinchuk, and G. V. Slyozkin, “History of the Development of Short-Range Radio Navigation Systems at Research Institute 33 – VNIIRA (1951–2005),” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 3, pp. 493–522, 2026, doi: 10.21227/6xd3-2y31. (In Russ.).

References

- [1] Yu. T. Krivoruchko and Yu. G. Shatrakov, “Creation of Radio Beacon Instrument Landing Systems for the Highly-Maneuverable Aircrafts in USSR,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 7, no. 4, pp. 780–797, 2024.
- [2] Yu. T. Krivoruchko, “Fifty Years in the Troops of All-Union Scientific Research Institute of Radio Equipment,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 8, no. 5, pp. 835–860, 2025. (In Russ.).
- [3] P. P. Yermolov, “The Compendium–Table–Infographics (CTI) Methodology in the Historiography of Science and Technology,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 8, no. 1, pp. 124–151, 2025.
- [4] Research Institute – 33 / VNIIRA (mss). St. Petersburg, 2011. (In Russ.).

Information about the authors

Pavel P. Yermolov, Candidate of Technical Sciences, Professor in the Engineering Department of the Higher Technological School “Sevastopol Instrument-Making Institute” of Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-9089-974X.

Gennady V. Slyozkin, Senior Lecturer in the Engineering Department of the Higher Technological School “Sevastopol Instrument-Making Institute” of Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Viktor I. Katerinchuk, Postgraduate Student in the Engineering Department of the Higher Technological School “Sevastopol Instrument-Making Institute” of Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

УДК 621.37-621.39(091)

Ламповые триоды Кавендишской лаборатории и других Британских компаний

Пестриков В. М.

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

pvm205@yandex.ru

Получено: 13 декабря 2025 г.

Отрецензировано: 20 декабря 2025 г.

Принято к публикации: 20 декабря 2025 г.

Аннотация: Проведено исследование организации научно-исследовательских работ по разработке радиоламповых технологий в Великобритании с начала Первой мировой войны и до середины 20-х годов XX века. Рассмотрены ранние конструкции ламповых триодов, разработанные в Кавендишской лаборатории и отмечены их недостатки. Дано объяснение выбора французской лампы R в качестве прототипа для серийного производства британских триодов компаниями Osram-Robertson и BTH. Уделено внимание разработкам мощных генераторных триодов компанией Marconi, которые были использованы в 1922 году в передатчике первой Британской радиовещательной станции 2MT Writtle. Проведен анализ значимости разработанных радиотехнологий компанией A. C. Cossor Limited, которая была лидером в начавшемся производстве электронных ламп в Великобритании в начале 20-х годов XX века.

Ключевые слова: ламповый триод *tuna White*, Marconi-Osram Valve Company, Кавендишская лаборатория, компания BTH, радиостанция 2MT, A. C. Cossor Co., ламповый триод Cossor.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Ламповые триоды Кавендишской лаборатории и других Британских компаний // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2026. Т. 9, № 3. С. 523—546.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Пестриков, В. М. Ламповые триоды Кавендишской лаборатории и других Британских компаний / В. М. Пестриков // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2026. — Т. 9, № 3. — С. 523—546.

1. Введение

К началу Первой мировой войны Великобритания очень отстала от США и Германии в области разработки ламповых технологий, в частно-

сти, усилительных ламп (триодов). Своих разработок на тот момент у нее не было. Первый английский газонаполненный ламповый триод, изготовленный Г. Раундом, был разработан благодаря технической поддержке *Telefunken*. Обращение британских военных к ученым и инженерам страны организовать не только собственные разработки триодов, но и их серийное производство, не осталось без внимания. Компании *Marconi* и *GEC* создали новую компанию *Marconi-Osram Valve Company* специально для разработки и производства усилительных ламп. К решению этой проблемы подключились и другие научные и производственные структуры Британии, в частности, *Кавендишская лаборатория, компании BTH, A. C. Cossor, Mullard* и другие.

2. Ламповый триод типа *White*

Во время Первой мировой войны британскими вооруженными силами использовалось небольшое количество радиоаппаратуры на мягкой лампе типа «*White*». Этот ламповый триод явился результатом работы, проделанной в Кавендишской лаборатории в Кембридже (*Cavendish Laboratory, Cambridge*) под руководством сэра Дж. Дж. Томсона (*Sir J. J. Thomson*). Ранние конструкции ламповых триодов в Кавендишской лаборатории были сделаны сотрудниками лаборатории Райтом (*Wright*) и Огденом (*Ogden*). Более поздние разработки были осуществлены Г. Уайтом (*G. W. White*), от фамилии которого лампа и получила обозначение *White valve*.¹ Уайт некоторое время работал над использованием ламп с холодным катодом, и в результате сумел разработать триоды, которые удовлетворительно работали в беспроводной связи. Эти лампы не были такими чувствительными, как лампы с горячим катодом, хотя и обладали некоторыми преимуществами. Никакой батареи накаливания не требовалось, и их функционирование не зависело от небольшого изменения внутреннего давления.

Уайт в конце концов отказался от холодного катода, вероятно, из-за повышенной чувствительности к колебаниям приложенного напряжения, и перешел к конструкции катода накаливания. Ламповый триод типа *White*, который нашел в практическое применение в 1916 году, показан на рис. 1. Этот триод, типа, как и лампы Раунда, относился к мягким лампам. Лампы этого типа, как известно, для достижения требуемой чувствительности должны содержать газ низкого давления. Физический размер этих ламп для его работы в режиме усиления был продиктован необходимостью соответствовать определенному соотношению между объемом газа и

¹ White. URL: <http://www.r-type.org/exhib/abo0011.htm> (13.06.2024).

размерами электродов. Диаметр стеклянного баллона лампы составлял 60 мм, а высота с учетом цоколя — 150 мм.

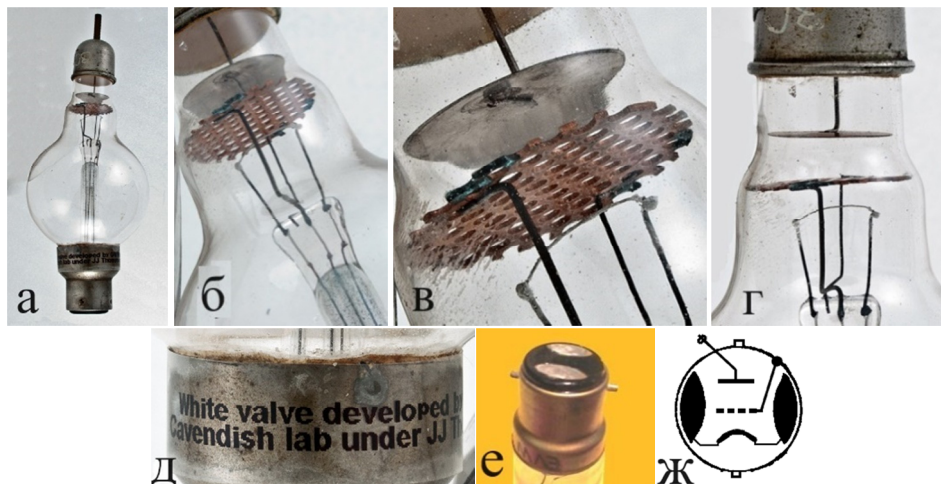


Рис. 1. Ламповый триод типа *White*: а — общий вид, б — медная сетка, в — крупный план сетки и нити, г — вид сбоку на электроды, показывающий расстояние между электродами, д — цоколь лампы с этикеткой², е — байонетный (штифтовой) цоколь лампы, ж — графическое обозначение лампового триода на радиосхемах.

Fig. 1. Tube triode of the White type: а — general view, б — copper grid, в — a close-up of the grid and filament, г — the electrodes side view showing the inter-electrode spacing, д — the base cap with the later addition of a plastic label, е — bayonet (pin) tube base, ж — graphic designation of a tube triode on radio circuits

Нить накала лампы была изготовлена из платины, покрытой оксидом, и работала с током 2,8 А при напряжении 6 В. Сетка представляла собой перфорированный медный диск (рис. 1б). Соединение с сеткой осуществлялось через корпус цоколя. Анод — плоский диск из железа (рис. 1в), амальгамированного ртутью. Для его подключения в схему использовался провод, конец которого зажимался рифленой гайкой в верхней части лампы, рис. 1а. Лампа функционировала при анодном напряжении от 25 до 75 В. Для подключения к батарее нити накала использовался цоколь байонетного типа (рис. 1е).

Ламповый триод типа *White* использовался в усилителе радиочастоты *Mark III*, который был разработан Британским экспериментальным институтом сигналов (*British Signals Experimental Establishment*) для полевых

² Надпись на цоколе лампы гласит: «Белый клапан, разработанный Г. Уайтом, Кавендишской лабораторией под руководством Дж. Дж. Томпсона, 1917 год» (англ. The band round the base reads: 'White valve developed by G.W. White, Cavendish Lab under J.J. Thompson 1917').

условий и впервые был изготовлен в апреле 1917 года, рис. 2. В усилителе *Mark III* использовались две лампы, вторая из которых была *DeForest Audion*. Этот усилитель предназначался для совместного использования с коротковолновым тюнером. Для повышения чувствительности при приеме слабых сигналов в усилителе использовалась регенерация, рис. 2.



Рис. 2. Усилитель радиочастоты *Mark III*. 1917 г. Общий вид ламповых триодов, установленных в усилителе РЧ: триод типа *White* и *DeForest Audion*.

Fig. 2. Radio frequency amplifier *Mark III*. 1917. General view of tube triodes installed in the RF amplifier: triode type *White* и *DeForest Audion*

Следует отметить, что по современным стандартам мягкие лампы, изготовленные Раундом и Уайтом, имели сравнительно большие физические размеры, как и оригинальное реле *LRS*. Это было необходимо для достижения стабильности работы. Любая попытка уменьшить объем лампы означала увеличение отношения площади электрода к объему присутствующего газа. Изменение температуры электрода оказывало большее влияние на остаточный газ. Чем меньше объем газа, тем более неустойчивой была лампа.

3. Первые английские серийные ламповые триоды

В период приближавшегося 1914 года вокруг Европы нарастала напряженность. К 1914 году компания *Osram* уже была ведущим производителем ламп в Великобритании, производя несколько десятков тысяч ламп в день и имея репутацию производителя ламп высокого качества. По всей вероятности, компания *Osram* была осведомлена о научных достижениях в области радиоламп и постепенно принимала более активное уча-

стие в разработке и опытном производстве по мере того, как начали появляться практические устройства. Конечно, *Osram* обладала материалами и технологиями, необходимыми для этой деятельности, хотя свидетельств этого участия осталось мало и они остаются лишь предположениями. Минобороны Великобритании нуждалось в производителях серийных высококачественных и надежных ламп, а не в лабораторных образцах, и компания *Osram* откликнулась на этот призыв. К 1916 году *Osram* стала крупным производителем радиоламп.

Ламповый триод, который так успешно был запущен в производство, был основан на конструкции французской лампы типа *ТМ*. Над образцами новейшего аудиона работала ламповая компания *Grammont* в Лионе при поддержке группы известных ученых-физиков, включая Бриллюэна (*Brillouin*) и Блоха (*Bloch*). Результатом этого сотрудничества стала новая, весьма характерная конструкция с цилиндрическим горизонтально установленным анодом. В отличие от лампы Раунда, *ТМ* представлял собой устройство с жестким вакуумом, которое в некоторых версиях могло работать при высоком анодном напряжении в качестве генератора в цепях передатчика. В лампе использовалась вольфрамовая яркая излучающая нить и совершенно новая приемлемая конструкция четырехконтактного цоколя.

Британская компания *Thomson-Houston Co. Ltd* (*British Thomson Houston* или *BTH*) для замены аудиона де Фореста разработала в 1916 году *BTH Audion*. Превосходство механической конструкции французского клапана *ТМ* было признано британцами. Интересно отметить, что французские ламповые триоды *ТМ*, которые потом стали конструкцией *Type R*, не производились в Великобритании до 1916 года.

В 1917 году *BTH* отказалась от конструкции *Audion* и выпустила новую лампу на основе французской *ТМ*, или жесткую лампу, которая стала потом известна как тип *R*. Буква «*R*» означала, что лампа предназначена для приема (англ. *The "R" stood for Receiving*). Триод имел недостаточную жесткость сетки, что приводило к микрофонному эффекту, который был уменьшен в лампах типа *BTH «А»* и других лампах путем подвешивания спирали сетки на цепном проводе. Компанией *BTH* также была разработана мягкая лампа, наполненная азотом низкого давления типа *R2*³, а затем и гелием, на основе той же конструкции французской лампы *ТМ*, названной *R2A*.⁴

Ламповый триод *R2* с 1916 г. производился в больших количествах также компанией *Osram-Robertson Lamp Company*, рис. 3. На рис. 3а лампа *Osram* имеет маркировку «Беспроводной прием» № *R2* (*Wireless Receiving*).

³ Tube R2. URL: <http://www.r-type.org/exhib/abz0010.htm> (13.06.2024).

⁴ Tube R2. URL: <http://www.r-type.org/exhib/aac0045.htm> (13.06.2024).

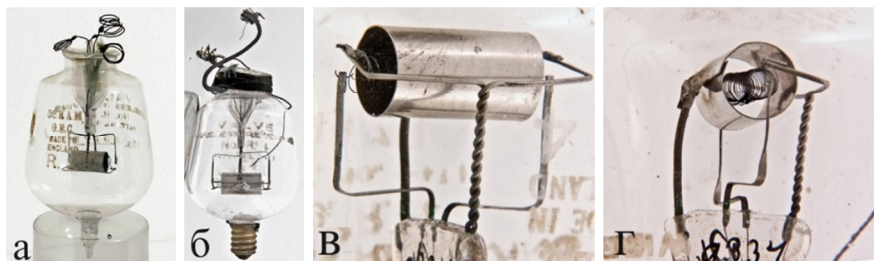


Рис. 3. Ламповые триоды производства *Osram* типа: а — R2 (на фото цоколь отсутствует), б — R4, в — анод, опоры анода и опоры для зажима нитей в триоде R4, г — конструкция анода и опор в триоде R4, заимствованная из конструкции французского триода R.

Fig. 3. Tube triodes manufactured by *Osram* type: а – R2 (no base in the photo), б – R4, в – anode, anode supports and supports for clamping threads in the R4 triode, г – design of the anode and supports in the R4 triode, borrowed from the design of the French triode R

Различные версии этой лампы R2 производились в больших количествах компанией *Osram-Robertson Lamp Company* с 1917 года и до конца Первой мировой войны. Компания *Osram* производила жесткую и мягкую версии одного и того же триода в течение 1-2 лет. Триод R2 и близкая ему по параметрам лампа типа D, появившийся чуть позже, использовалась в качестве детектора в военно-воздушных силах (*Air Force*) Великобритании. Эта лампа стала последней конструкцией мягкого триода.

На рис. 3б представлен жесткий вакуумный триод R4,⁵ разработанный на основе французского триода типа R (рис. 3в, г). Триод R4 был разработан со специально малым расстоянием между катодом сеткой для использования в качестве генератора малой мощности в гетеродинных приемниках. Надпись на стеклянном баллоне гласит: Беспроводной прием Valve R.4 Patt. № 4411. A8971. На другой стороне написано: *Osram GEC* «Made in England». P.4. Надпись читается сверху вниз, когда лампа ввинчена в винтовой держатель.

К 1919 году в Великобритании отдавали предпочтение лампам типа R и R2, а не лампам Раунда. Триод R2 был выбран в качестве основы для всех будущих конструкций усилительных ламп. Он некоторый период времени выпускался с мягким вакуумом, поскольку жестким лампам не хватало необходимой чувствительности.

Неустойчивые характеристики мягких ламп проложили путь к повсеместному внедрению жестких триодов, несмотря на то, что для достижения того же усиления мягкого триода требовалось несколько каскадов жестких ламп. Помимо этого, не последнюю роль сыграли технологичность и простота использования жестких триодов.

⁵ Tube R4. URL: <http://www.r-type.org/exhib/aaj0095.htm> (13.06.2024).

Особые отношения между *Osram* и Военным ведомством Великобритании, сложившиеся во время чрезвычайного положения в стране, оставались особенностью деятельности компании на протяжении всех последующих лет, вплоть до Второй мировой войны и в послевоенный период. Компания *M-OV* разработала и произвела целый ряд ламповых триодов версии типа *R* (табл. 1).

Табл. 1. Характеристики некоторых типов ламповых триодов, производившихся в Великобритании 1919—1937 гг.

Table 1. Characteristics of some types of tube triodes produced in Great Britain from 1919 to 1937

Тип лампы	Напряжение нити накала, В	Ток нити накала, А	Устройство лампы	Тип вакуума	Производитель
<i>Lamp type</i>	<i>Filament voltage</i>	<i>Filament current</i>	<i>Lamp design</i>	<i>Vacuum type</i>	<i>Manufacturer</i>
<i>R</i>	4—6,0	0,84	Триод	Жесткий	<i>Osram</i>
<i>R1</i>	4—6,0	0,84	Диод	Жесткий	<i>Osram</i>
<i>R2</i>	3,5	1,2	содержит азот	Мягкий	<i>Osram</i>
<i>R2A</i>	3,5	1,2	содержит гелий	Мягкий	<i>Osram</i>
<i>R4</i>	3,8	0,65	Триод	Жесткий	<i>BTH, Osram</i>
<i>R4A</i>	3,8	0,65	Триод	Жесткий	<i>BTH, Osram</i>
<i>R4B</i>	3,8	0,65	Триод	Жесткий	<i>Osram</i>
<i>R4C</i>	3,8	0,65	Триод	Жесткий	<i>Osram</i>
<i>R5</i>	5,0	0,8	Триод	Жесткий	<i>Mullard & Z Lamp Works, Osram</i>
<i>R5V</i>	5,0	0,7	Триод	Жесткий	<i>Osram</i> на базе <i>V24</i> , но с колпачком желудя <i>R6</i>
<i>R7</i>	3,5—3,7	—	Триод	Жесткий	Создано <i>Mullard</i> , но также производился <i>Osram NR7A</i> в специальном формате военно-морского типа

Из табл. 1 видно, что каждый ламповый триод имеет ряд версий, а также предназначение для определенной области применения. Например, триод *R5*,⁶ (рис. 4а) был спроектирован как усилитель высокой частоты и был легко узнаваем визуально, поскольку ось триода была установлена вертикально. Цоколь лампы соединялся с однопонтевой нитью накала. Провода с шелковой изоляцией подключались к аноду и сетке. Анод представляет собой блестящий цилиндр длиной 17 мм и диаметром 10 мм. Сетка сделана в виде открытого переплетения тонкой проволоки, закрепленной на одном тонком стержне между двумя концевыми опорами. Стекланный баллон

⁶ Tube R5. URL: <http://www.r-type.org/exhib/aac0064.htm> (13.06.2024).

имеет диаметр 48 мм и высоту 85 мм, включая основание цоколя. Версия триода *R5* под наименованием тип *C* использовалась BBC в 1918 году.



Рис. 4. Версии лампового триода производства *Osram*: *а* — тип *R5*, *б* — тип *R5V*, *в* — анод и пружина, удерживающая верхнюю часть перевернутой *V*-образной нити в лампе *R5V*.

Fig. 4. Osram tube triode versions: *a* – type *R5*, *б* – type *R5V*, *в* – anode and spring holding the upper part of the inverted *V*-shaped filament in the *R5V* tube

Триод типа *R5V*⁷ (рис. 4б) производства *M-OV* стал первой британской приемной лампой высокого вакуума, в которой использовалась подпружиненная нить «перевернутой *V*». Такой тип нити был предложен капитаном Раундом для военных ламп, а также использовался в некоторых американских лампах. Триод *R5V* был первой лампой *M-OV*, разработанной для коммерческих, а не военных целей. Этот триод допускал использование анодного напряжения до 120 В. Низкое значение сопротивления анодной нагрузки ($R_a = 30$ кОм) триода позволяло получить достаточную мощность звука для работы рупорного громкоговорителя. Триод *R5V*, как и тип *R*, оставался в каталогах до начала Второй мировой войны. Отличием *R5V* от *R*-типа является меньшее сопротивление анода и напряжение накала 5,0 В.

Мягкие триоды, то есть газонаполненные, которые выпускались в Британии, работали при низком анодном напряжении, обычно около 20 В. Конструкция триода являлась стандартной для того периода времени. Нить накала проходила через центр анодного цилиндра, а сетка представляла собой проволочную спираль, которая окружала нить накала и имела крепления обоих концов на поддерживающих стойках.

ВМФ Британии продолжал разрабатывать и совершенствовать мягкие радиолампы. Более поздние типы, в том числе *R2A* и *R2B*, внешне были похожи на *R2* и *R5*, но имели другое газовое наполнение.

⁷ Tube *R5V*. URL: <http://www.r-type.org/exhib/aaj0174.htm> (13.06.2024).

4. Мощные передающие ламповые триоды

Триод типа *R* применялся не только в усилителе РЧ, но и в качестве выходного генератора в беспроводной передаче. Он использовался в этой роли в наборе *W1 Marconi Trench Mk3*. Лампа в этой конфигурации была способна излучать мощность около 10 Вт в длинноволновом диапазоне. Во время войны военные, в частности, военно-морской флот, осознали необходимость для связи на больших расстояниях гораздо большей мощности в широком диапазоне частот. «Центром знаний в области ламповых технологий внутри учреждения» стала Адмиралтейская школа связи (*Admiralty Signal School*), которую возглавил Б. С. Госслинг (*B. S. Gossling*), позже он присоединился к компании *M-OV*. Отсутствие производственной базы заставило Госслинга обратиться к промышленности, и снова откликнулась компания *Osram*. К 1918 году компания *Osram* в тесном сотрудничестве с Королевским военно-морским флотом (*Royal Navy*) разработала и производила целую серию классических двухконцевых триодных передающих ламп серии *T* без цоколей (рис. 5) и связанных с ними устройств (аналогичные типы, изготовленные для Маркони, получили название *MT*), с излучаемой радиочастотной мощностью от 10 до 500 Вт. Эти лампы были предшественниками мощных передающих ламп, которые понадобились для вещания в следующем десятилетии.

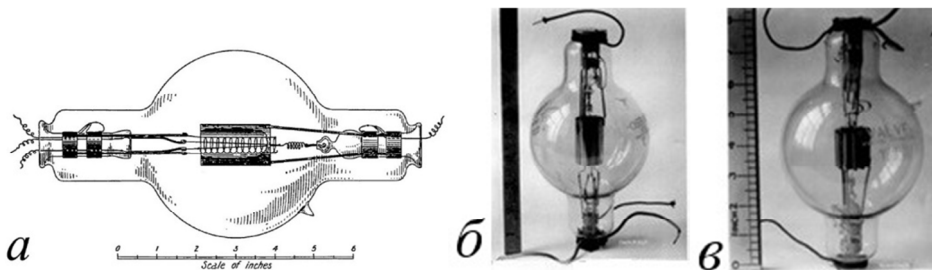


Рис. 5. Устройство генераторной лампы T1 (a) большой мощности (1918 г.) и ее промышленный образец (б). Генераторная лампа T2B (в).

Fig. 5. The design of the high-power T1 generator tube (a) (1918) and its industrial prototype (б). The T2B generator tube (в)

На выставке, организованной Физическим и оптическим обществом (*Physical and the Optical Society*) в Имперском научном колледже Кенсингтона (*Imperial College of Science, Kensington*) 7—8 января 1920 г. [1], компания *M-OV* представила линейку радиоламп, среди которых было не менее тринадцати отдельных генераторных ламп (рис. 6) вместе с шестью соответствующими выпрямительными устройствами большой мощности и шестью приемными устройствами.

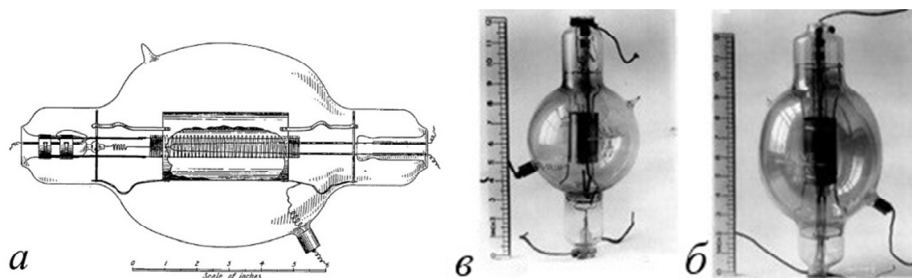


Рис. 6. Устройство генераторной лампы T4A (а) большой мощности (1918 г.) и ее промышленный образец (б). Генераторная лампа T3 (в).

Fig. 6. The design of the high-power T4A generator tube (a) (1918) and its industrial prototype (б). T3 generator tube (в)

Компания *M-OV* разработала целое семейство генераторных триодов с относительно низкой мощностью типа *BWO* (*British War Office*), которые очень напоминали устройства с одной нитью накала и рассеивающих около 30 Вт, до устройств с рассеиваемой мощностью 800 Вт 17X, которые работали при мощности примерно 8 кВт. Во всех этих лампах использовались вольфрамовые нити накала с прямым нагревом.

Лампа *MT3* компании *Marconi*, разработанная Раундом, использовалась в передатчиках и авиационных радиостанциях. Этот триод применялся в нескольких послевоенных авиационных радиостанциях, например, в передатчике типа *AD1* и бортовом телефонно-телеграфном передатчике/приемнике типа *AD2*, рис. 7 [2]. Компактный прибор *AD2* устанавливался в деревянном корпусе и использовал одну лампу *MT3* в качестве генератора мощности, а вторую — в качестве лампы управления речью. В его приемнике использовались лампы типов *Q* и *V24*. Общий вес радиостанции *AD2* составлял 29 кг. Лампа *MT3* также использовалась в портативных полевых передатчиках *Marconi* мощностью 100 Вт типа *YB1*.

Большинство версий генераторных триодов с большой мощностью имело характерную новую форму корпуса. Двусторонние лампы содержали большую выпуклость посередине стеклянного баллона и вентильные выступы по бокам. Аноды и сетки, как правило, представляли собой цилиндрические конструкции, подобные более крупным версиям *R*-типа. К этому моменту большинство радиоламп питалось от батарей. Обеспечение потенциала *HT* (*High Tension*) для работы с этой новой линейкой генераторных ламп большой мощности было непростым делом, так как батареи, обеспечивающие напряжение до 8000 В, были непрактичны. Требовался вентиль большой мощности, чтобы питать аппаратуру от сети переменного тока. Проблема была решена самым элегантным образом [1]. Из генера-

торной лампы исключили сетку и в результате получили выпрямительный диод с требуемыми характеристиками.

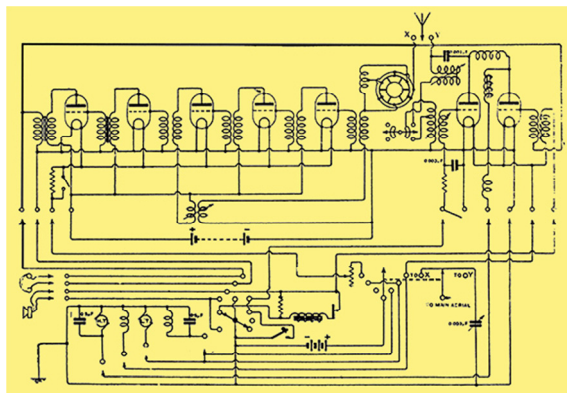


Рис. 7. Принципиальная схема авиационного радиотелефонного передатчика/приемника *Marconi AD2* (около 1924 г.) [2].

Fig. 7. Schematic diagram of the Marconi AD2 aircraft radiotelephone transmitter/receiver (circa 1924) [2].

Производство мощных генераторных триодов, позволило открыть радиовещание в Великобритании, рис. 8. Идея использования беспроводных передач для чего-либо, кроме азбуки Морзе, была еще очень новой. 14 февраля 1922 года в 19:30 в деревне Вриттл (*Writtle*), недалеко от Челмсфорда (*Chelmsford*) в 50 км от Лондона, вышла в эфир радиостанция *2MT Writtle* (также известная как *Two Emma Toc*) с записью «Танца цветов» (*The Floral Dance*) британского баритона Роберта Хоу (*Robert Howe*). Радиостанция *2MT* опередила своим выходом BBC на несколько месяцев.

Схема передатчика радиостанции *2MT Writtle* изображена на рис. 8⁸. Работа схемы основывается на автоколебательном механизме с использованием реактивной катушки, соединенной с основным колебательным контуром. Реактивная катушка была настроена на 0,7 от рабочей длины волны.

В радиопередатчике *2MT* использовалось три генераторных лампы *MT4 Marconi* и две выпрямительные лампы *MR1* в стеклянных корпусах, рис. 8. Напряжение накала ламп генерировалось двумя 4-цилиндровыми двигателями *Austin* от автомобилей. Первичное питание высоковольтных трансформаторов и трансформаторов накала обеспечивалось однофазным генератором переменного тока напряжением 400 В и частотой 300 Гц, приводимым в движение двигателем постоянного тока напряжением 110 В.

⁸ Marconi Station 2MT Writtle // *Wireless World*, January, 1963.

Антенная система включала 4 параллельных провода, подвешенных на 3,7-метровых распорках, которые поддерживались двумя мачтами *Marconi* высотой 34 м и располагались на расстоянии 61 м друг от друга.

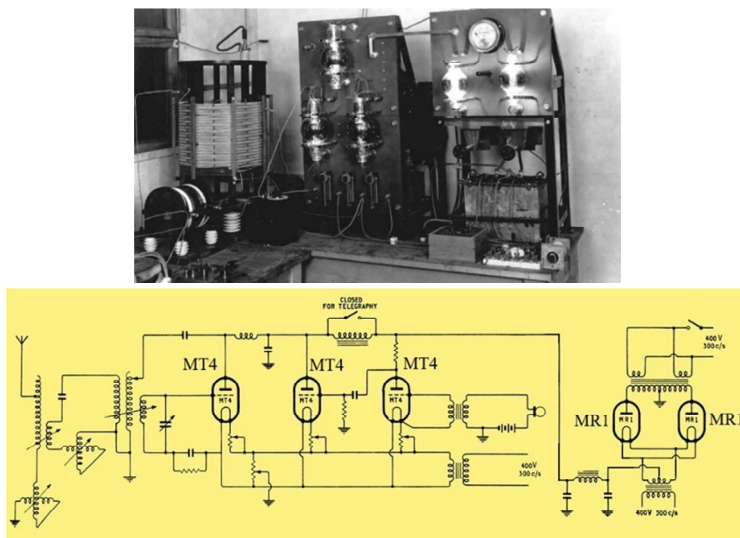


Рис. 8. Общий вид радиопередатчика на генераторных триодах *MT4* *Marconi* радиостанции *2MT* (1922 г.). Принципиальная схема радиопередатчика радиостанции *2MT*.

Fig. 8. General view of the radio transmitter on *MT4* *Marconi* generator triodes of the *2MT* radio station (1922). Schematic diagram of the *2MT* radio transmitter

Радиостанция *2MT* вначале вещала в длинноволновом диапазоне на частоте 428 кГц (700 м). Через 3 месяца *2MT* перешла на средневолновый диапазон 400 м (750 кГц). Это техническое изменение было необходимо из-за нежелательных помех от многочисленных гармоник, излучаемых станцией *2MT*, а также дугowymi передатчиками на почтовом отделении в Лифилде (*Leafild*).

5. Ламповые триоды компании *A. C. Cossor*

Компания *A. C. Cossor Limited* была одной из первых компаний, начавших производство электронных ламп в Великобритании. Компания была создана Альфредом Коссором (*Alfred Charles Cossor*, 1861—1922) в 1890 году для производства термометров в лондонском приходе Сент-Джонс-Клеркенуэлл (*St. John's Clerkenwell*). С самого начала своей карьеры Коссор наладил производство газоразрядных трубок для ученых, в частности, для сэра Уильяма Крукса и фотографов-экспериментаторов. В

1904 году компания изготовила экспериментальные вакуумные диоды для Амброуза Флеминга [3].

В 1907 году к компании *Cossor* присоединился Уильям Ричард Буллимор (*William Richard Bullimore*, 1886—27.07.1937), инженер-электрик австралийского происхождения, который в детстве эмигрировал в Великобританию. В компании Буллимор он отвечал за внедрение новых типов электровакуумных приборов.

В 1910 году после кончины Альфреда Коссора Буллимор приобрел контрольный пакет акций компании. Он стал управляющим директором компании и занимал эту должность до конца своей жизни.

До Первой мировой войны *A. C. Cossor* была одной из трех британских компаний, производивших электронные лампы. Во время войны до 1922 года компания выпускала стандартные лампы типа *R* с вольфрамовой нитью накала. К 1918 году компания *Cossor* упрочила свое место на рынке радиотехники, что позволило ей открыть крупный завод по производству электронных ламп в Хайбери-Гроув (*Highbury Grove*) на севере Лондона. В начале 20-х годов XX века в компании велись интенсивные разработки новых типов термоионных радиоламп. Было получено до трех десятков патентов на изобретения, среди них выделялись необычные конструкции вакуумных триодов, которые сделали рекламу компании. В 1921 году Буллимор запатентовал вакуумный триод с шаровыми электродами, рис. 9 [4].

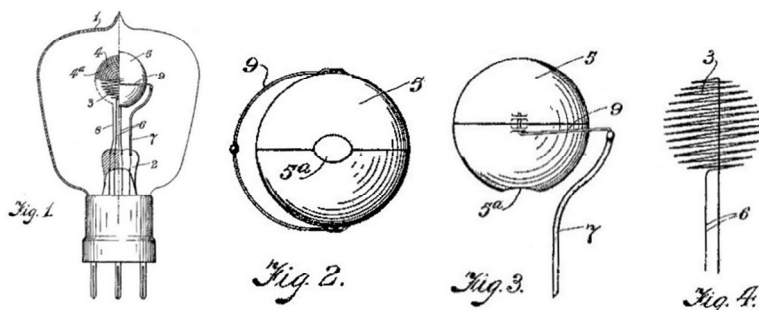


Рис. 9. Устройство вакуумного триода с шаровыми электродами согласно патенту GB192464A Уильяма Буллимора с приоритетом от 31 октября 1921 г. [4].

Fig. 9. The device of a vacuum triode with spherical electrodes according to the patent GB192464A of William Bullimore with priority dated October 31, 1921 [4]

Цель изобретения такой необычной конструкции триода (рис. 9) заключалась в том, чтобы окружить нагретую нить накала сеткой и анодом таким образом, чтобы использовать практически всю ее электронную эмиссию. При этом расстояние между электродами должно быть фиксированным. Фиксация межэлектродного расстояния оберегала лампу от по-

вреждений при эксплуатации, транспортировке или производстве. Нить накала формировалась таким образом, чтобы ее внешние размеры были максимально приближены к сферическим. Вокруг нити накала устанавливалась сетка, также имеющая сферическую форму. Конфигурация анода предполагала сферический вид, но могла быть изготовлена и из металлической сетки или пластины.

В процессе работы триода (рис. 9) использовалась полная электронная эмиссия нагретой нити накала, что позволяло достичь максимального эффекта управления электронным потоком между нитью накала и анодом. При этом предотвращалась электризация стенок стеклянной колбы. Симметричность конструкции исключала относительное смещение электродов лампы, а также устранило рассеивание электрических полей.

Сложность изготовления триода с шаровыми электродами (рис. 9) не позволила наладить его промышленное изготовление. Идея использования полной электронной эмиссии нагретой нити накала была воплощена Буллимором в патенте *GB197853A* на конструкцию с полусферическим анодом, внутри которого располагалась нить накала, рис. 10а [5]. В новой конструкции удалось снять жесткое требование на фиксированное расстояние между электродами в виде сфер. Это было достигнуто благодаря использованию специальной конструкции электродов, которая обеспечила более надежную защиту от вибрации сетки или анода, а также от провисания нити накала в результате эксплуатации. При реализации изобретения нить накала или нагревательный элемент устанавливались между двумя проводниками таким образом, чтобы образовать дугу, форма которой могла быть близкой к полукругу, или подобной формы. Расстояние между концами нити накала должно было быть меньше высоты дуги. Над дугой нити накала находился сеточный электрод, изготовленный из перфорированной или цельнометаллической сетки. Нужно отметить, что конструкция триода с полусферическими электродами была известна до изобретения Буллимора, патент *US1391671A* Горация Донисторпа (*Horace St. John De Aulâ Donisthorpe*), рис. 10б [6]. Отличие изобретения Буллимора заключается только в конструкции нити накала (рис. 10а, Fig. 3). У Донисторпа форма нити накала представляет собой петлю 4, которая в виде окружности расположена в одной диаметральной плоскости под поверхностью сетки 7 рис. 10б (Fig. 1). В патенте Буллимора нагревательный элемент выполнен в виде дуги с вершиной, направленной вверх, рис. 10а (Fig. 3). Выбранная конструкция нити накала позволила отказаться от пружины и крючков для ее фиксации.

Тестирование реальной конструкции вакуумного триода с полусферическими электродами (рис. 10) показало, что описанная лампа обладает

высокой электрической эффективностью, поскольку благодаря описанной форме и расположению электродов используется практически вся эмиссия электронов с нити накала, а электризация стекла баллона сводится к минимуму [5].

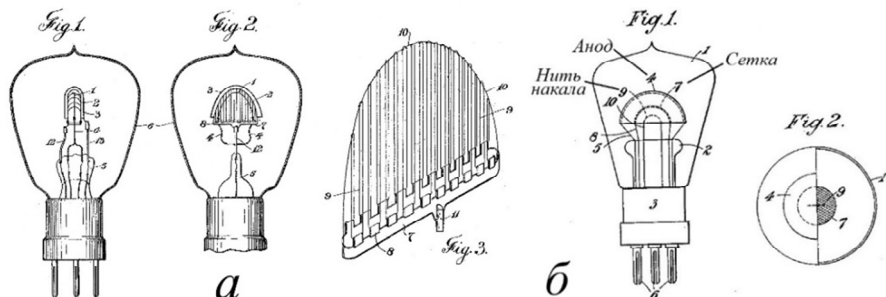


Рис. 10. Устройство вакуумного триода: *a* — с полусферическими электродами согласно патенту GB197853A Уильяма Буллимора с приоритетом от 22 июня 1922 г. [5], *б* — с полусферическими электродами согласно патенту US1391671A Горация Донисторпа с приоритетом от 23 марта 1921 г. [6].

Fig. 10. Vacuum triode device: *a* – with hemispherical electrodes according to patent GB197853A of William Bullimore with priority dated June 22, 1922 [5], *b* – with hemispherical electrodes according to patent US1391671A of Horace Donisthorpe with priority dated March 23, 1921 [6]

Триод по патенту GB197853A, кроме того, свободен от микрофонного эффекта, а нить накала и несколько электродов сохраняют параллельность, несмотря на частое и длительное использование. Более того, в соответствии с полученными результатами, он оказался более экономичным в производстве и мог выпускаться в больших объемах с малым разбросом электрических параметров.

В октябре 1922 года компания *Cossor* представила партию из 50 прототипов ламповых триодов *Cossor P1* и *P2 Bright Emitter* по патенту GB197853A Уильяма Буллимора на Первой Всебританской выставке беспроводного радиовещания (*The First All-British Wireless Exhibition*), которая проходила в Садоводческом зале Вестминстера (*Horticultural Hall, Westminster*). Лампы *Cossor P1* и *P2* были изготовлены вручную и имели куполообразные аноды с веерообразными сетками и дугообразными нитями накала. Существует предположение, что конструкция триодов *Cossor P1* и *P2* была разработана с целью обойти патент CH91053A Маркони на цилиндрическую сетку и анод.

Для массового производства ламп *Cossor P1* и *P2*, компания *Cossor* разработала и изготовила необходимое оборудование. Промышленные образцы ламповых триодов *Cossor P1* и *P2 Bright Emitter* (рис. 11) были

выпущены 14 ноября 1922 года к открытию радиостанции *BBC*. Лампа *P1* предназначалась для использования в детекторных каскадах радиоприемников и усилителях звуковой частоты.



Рис. 11. Общий вид триодов *Cossor P1* и *P2 Bright Emitter* с металлическими и бакелитовыми цоколями. Общий упаковочной коробки *P1* и *P2* (1922—1925 гг.). Цветная метка в верхней части баллона *Cossor P2* указывала на ее отличие от *Cossor P1*.
Fig. 11. General view of Cossor *P1* and *P2 Bright Emitter* triodes with metal and bakelite bases. General view of the *P1* and *P2* packaging box (1922–1925). A colored mark on the top of the Cossor *P2*'s cylinder indicated its difference from the Cossor *P1*

Лампа *P1* выпускалась компанией *Cossor* с металлическим цоколем, позже — с бакелитовым, рис. 11. Для работы на высоких частотах *Cossor* выпустила триод *P2*. Лампы *P1* и *P2* не содержали газопоглотителя.

Новая лампа *P1* вскоре получила у радиотехников название «*tin-hat*» (оловянная шляпка) из-за сходства куполообразного анода со стальным шлемом, использовавшимся британской армией в Первой мировой войне.

Уникальность конструкции триода *P1* (рис. 12) была отмечена многими научно-техническими изданиями, хотя его эффективность была весьма сомнительной. Реклама компании *Cossor* утверждала, что конструкция обеспечивает исключительный коэффициент усиления, поскольку «...сетка в форме колпака и анод в сочетании с изогнутой нитью накала используют практически весь поток электронов. Ни один из них не может ускользнуть за стенки стеклянного баллона». Кроме того, конструкция считалась практически лишенной микрофонного эффекта, поскольку ее сетка в форме колпака была достаточно прочной и чрезвычайно жесткой, а каждый ее виток закреплен в трех точках. Проводились даже параллели между сроком службы изогнутой нити накала и долговечностью римских арок!

Лабораторные испытания триода *P1* показали, что лампа более подходит для выпрямления электрического сигнала, чем другие триоды общего назначения, благодаря своей разомкнутой сеточной структуре и низкому импедансу. Триод *P1* был признан как «...первоклассный усилитель низкой частоты с анодным напряжением, значительно превышающим стандартные 20—30 В, указанные производителем»⁹. Более поздним те-

⁹ A C Cossor. URL: <https://www.r-type.org/adverts/adv-0908.htm> (12.12.2025).

стированием было установлено, что для хорошего усиления низких частот требуется анодное напряжение 80 В и сеточное смещение от $-1,5$ до $-2,0$ В. Полученное семейство рабочих характеристик лампы *P1* не существенно отличаются от характеристик других «универсальных» ламп того периода, в частности, коэффициент усиления весьма незначителен, несмотря на заявления о новой структуре электродов [7].

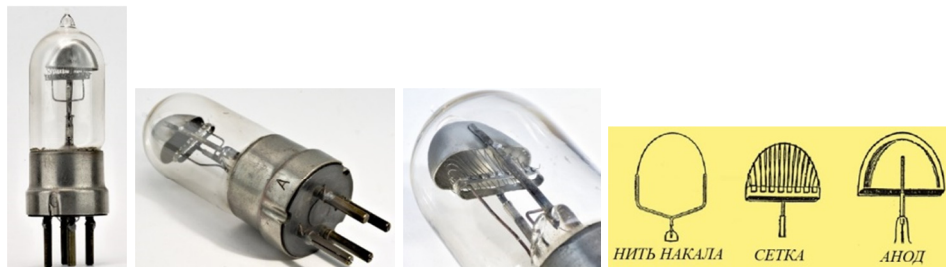


Рис. 12. Общий вид и устройство вакуумного триода *Cossor P1 Bright Emitter Triode*.¹⁰

Fig. 12. General appearance and design of the Cossor P1 Bright Emitter Triode vacuum triode¹⁰

Триод *P2* был специально разработан для усиления высоких частот и несколько отличался от *P1*. Изменения коснулись сетки и расстояния между ней и нитью накала. Тестирование *P2* показало, что внутреннее сопротивление между нитью накала и анодом составляет 75 кОм, а коэффициент усиления — 11,25 [8]. Оба показателя являются удовлетворительными, причем последний особенно хорошо соответствует величинам, указанным в паспорте большинства усилительных триодов. Этот показатель обычно колеблется от 6 до 10. В заключении отчета тестировавшей *P2* лаборатории было отмечено: «Компания *Cossor* заслуживает поздравлений за создание лампы, которая доставит пользователям большое удовлетворение и станет достойным партнером для их превосходного оборудования» [8, p. 126].

В конце 1923 года компания *Cossor* анонсировала линейку ламп типа *Wuncell*, но, вероятно, их производство было сложным, поскольку сами лампы появились только в 1924 году. Название *Wuncell* указывало на то, что для работы таких триодов необходим всего один 2-вольтовый аккумулятор. В лампах типа *Wuncell* использовалось оксидное покрытие, нанесенное непосредственно на нить накала. Ламповые триоды такого типа были очень экономичными и знаменовали собой значительный прогресс в ранней технологии радиосвязи для бытового использования.

Ламповые триоды типа *Wuncell* были первыми лампами такого типа, разработанные и произведенные в Великобритании после Первой мировой войны. Покрытие на лампах *Wuncell* было не очень долговечным, предпо-

¹⁰ Cossor P1 Bright Emitter Triode. URL: <https://lampes-et-tubes.info/rt/rt140.php?l=> (12.12.2025).

ложительно из-за сложности поддержания адгезии между смесью оксидов бария со стронцием и раскаленной проволокой нити накала. Первоначально существовало три типа триодов *Wuncell*: *W1*, *W2* и *W3*, рис. 13. Эти лампы были разработаны для облегчения перехода от 6 В питания накала для ламп с вольфрамовой нитью накала к 2 В питанию для ламп с оксидным покрытием. Лампа *W1* (рис. 13а) являлась прямой заменой более ранней модели *Cossor P1*, а лампа *W2* с большим импедансом должна была заменить *Cossor P2*.

Фактический запуск в производство типа *W3* (рис. 13в, г) был отложен до середины 1925 года. У триода *W1* имелся дополнительный боковой контакт на цоколе, который позволял подсоединять источник питания нагревателя на 4 В или 6 В, рис. 13б. Обычные контакты для нити накаливания были рассчитаны на 2 В.

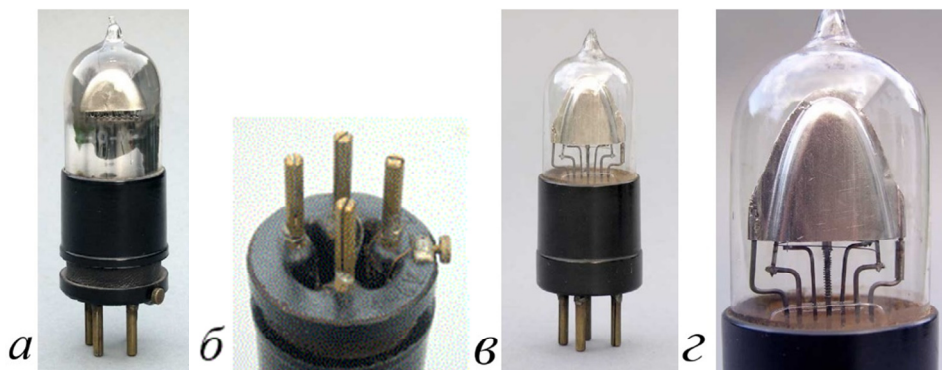


Рис. 13. Конструкция триода типа *Cossor Wuncell*: а — общий вид *W1*, б — вид дополнительного бокового контакта на цоколе *W1* для подключения источников накала с различным выходным напряжением, в — общий вид выходного триода *W3*, г — структура анода *W3*.

Fig. 13. Design of a Cossor Wuncell triode: а — general view of *W1*, б — view of an additional side contact on the base of *W1* for connecting filament sources with different output voltages, в — general view of the output triode *W3*, г — structure of the anode *W3*

В ноябре 1924 года были анонсированы еще три типа триодов с прямым накалом: *WR1*, *WR2* и *WR3*. Тип *WR3* не был запущен в производство. Лампа *WR1* (рис. 14а, б) предназначалась для низкочастотного диапазона, а *WR2* — высокочастотного. Триоды *WR2* обычно окрашивались в верхней части баллона розовой или красной краской. Триоды типа *WR Wuncell Cossor* отличались от предыдущей серии *W Wuncell Cossor* только наличием в цоколе лампы проволочного резистора для понижения напряжения до требуемой величины при питании нити накала от аккумуляторов с различным выходным напряжением.

Две лампы *WR1* и *WR2* имели встроенный в литой цоколь проволочный резистор 8 Ом, соединенный последовательно с нитью накала, рис. 14в. Это позволяло питать нить накала от аккумуляторов 2 В, 4 В или 6 В. У лампы типа *WR* имелся винтовой клеммник, расположенный рядом с контактным штырьком нити накала, с двумя отверстиями для вставки, рис. 14г. Если винт ввинтить в отверстие, непосредственно прилегающее к контакту нити накала, то закорачивался резистор и для нити накала использовался аккумулятор на 2 В. Если же винт ввинчивался во второе отверстие, то нить накала могла работать от аккумулятора на 4 В или 6 В. В рекламе ламп типа *WR Wuncell Cossor* говорилось: «Лампа *WR Wuncell* — это находка для пользователя многолампового комплекта, который хочет постепенно перейти на лампы с оксидным покрытием по мере замены существующих ламп. В таком случае, когда все лампы без покрытия нити будут заменены на лампы *Wuncell*, сопротивление в их цоколях должно быть закорочено, и установлено питание от аккумулятора на напряжение 2 В».

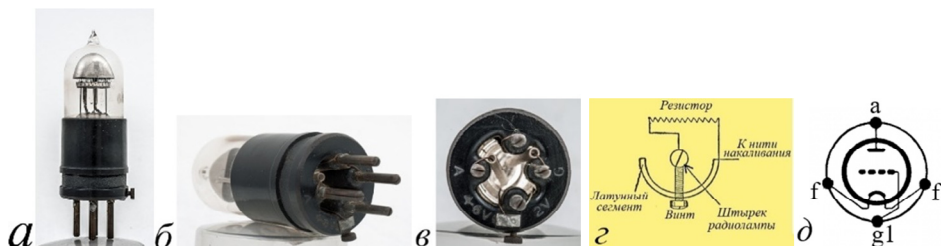


Рис. 14. Триод прямого накала типа *WR1 Wuncell*: *a* — общий вид, *б* — вид цоколя, *в* — вид переключателя напряжения накала, *г* — схема переключателя напряжения накала, *д* — цоколевка и обозначение на радиосхеме.

Fig. 14. *WR1 Wuncell* directly heated triode: *a* — general view, *б* — base view, *в* — view of the heating voltage switch, *г* — heating voltage switch circuit, *д* — pinout and designation on the radio circuit

В 1924 году *Cossor* стал одним из основателей Ассоциации производителей электронных ламп (*Valve Manufacturers Association*), которая к 1926 году стала ядром Британской ассоциации производителей электронных ламп (*BVA*).

С 1930 года компания *Cossor* начала производство ламповых триодов по новой технологии. Была выпущена лампа *210DET*, у которой анод не имел классическую форму *Cossor* в виде шлема, а представлял собой простую прямоугольную коробку. Внедрение новой технологии положило конец использованию чашеобразных анодов. В табл. 2. представлены некоторые характеристики триодов с куполообразным анодом, выпущенные компанией *Cossor* в 1922—1925 годах [9]. В том же году, 1930 г., *Cossor*

представила первый британский ВЧ-пентод типа M.S./PEN. Пентод появился на три года раньше, чем было начато его производство другими компаниями. Импеданс анода M.S./PEN был низким, и лампа не получила широкого распространения.

Табл. 2. Некоторые характеристики триодов с куполообразным анодом (*tin-hat*), выпущенные компанией *Cossor* в 1922—1925 гг.

Table 2. Some characteristics of Tin-hat triodes produced by Cossor in 1922–1925

Тип лампы	Нить накала		Напряжение на аноде, В	Коэффициент усиления	Крутизна характеристики, мА/В	Импеданс, Ом
	Напряжение, В	Ток, А				
<i>Valve Type</i>	<i>Filament</i>		<i>Anode</i>	<i>Amplif. Factor</i>	<i>Mutual Conductance</i>	<i>Impedance</i>
<i>P1</i>	3,5–4,0	0,75	20–80	6,6	0,30	20000
<i>P2</i>	3,5–4,0	0,75	60–80	11,0	0,25	40000
<i>P3</i>	1,0–1,1	0,25	20–60	6,6	0,30	20000
<i>P4</i>	1,0–1,1	0,25	20–60	11,0	0,25	40000
<i>W1</i>	1,8–2,0	0,30	20–80	7,2	0,35	19000
<i>W2</i>	1,8–2,0	0,30	20–80	10,5	0,31	29000
<i>W3</i>	1,8–2,0	0,50	90–120	8,0	0,61	13000
<i>TM Metal (R)</i> , 1915 г.	4,0	0,7	40	10	0,4	25000
П-7, СССР, 1934 г.	3,8	0,65	40	10	0,34	30000
6C5C, CCC, 1958 г.	6,3 косвенный нагрев	0,3	250	20	2,2	9000
6C1П, СССР, 1969 г.	6,3 косвенный нагрев	0,15	250	26,2	2,35	11600

Анализ табл. 2 показывает, что характеристики триодов с куполообразным анодом не намного отличаются от других «универсальных» ламп, выпущенных до 40-х годов XX века (*TM Metal (R)* и П-7, СССР). Коэффициент усиления триодов *Cossor* также незначительно отличается от подобных ламп, несмотря на заявления компании *Cossor* о новой структуре электродов. Приведенные в табл. 2 ламповые триоды, выпущенные во второй половине XX века, по своим характеристикам превосходят ранее произведенные.

Компания *A. C. Cossor Ltd.* неуклонно развивалась, продавая лампы и радиоприемники в виде наборов под брендом «Короли эфира» (*Kings of the Air*). В 1930 году был расширен ассортимент продукции, начались продажи первых полных моделей радиоприемников, а в 1932 году, в него включили электронные приборы, в том числе осциллографы.¹¹

¹¹ A Potted History of some famous UK Radio Manufacturers. Cossor.
URL: <https://www.radiomuseum.co.uk/cossorhistory.html> (13.12.2025).

Производство радиоприемников *Cossor* продолжалось и после Второй мировой войны, количество различных моделей постепенно уменьшалось и закончилось с появлением магнитофонов.

Деятельность компании *A. C. Cossor Ltd.* не ограничивалась только разработкой и производством радиоэлектронных приборов и устройств. Ее интересы затрагивали и другие высокотехнологичные и инновационные области радиоэлектронной отрасли. Благодаря *A. C. Cossor* в начале Битвы за Британию была построена первая в мире действующая радиолокационная система *Chain Home*, которая обеспечивала защиту от Шетландских островов до мыса Лэндс-Энд. Однако во время Второй мировой войны британская промышленность не смогла наладить массовое производство десятков тысяч магнетронных ламп для работы радаров. Компания *A. C. Cossor* заключила с небольшой американской компанией *Raytheon* контракт на поставку магнетронов. Это позволило *Raytheon* стать основным поставщиком магнетронов для союзников в годы войны.

После Второй мировой войны компании *A. C. Cossor* и *Raytheon* продолжали лидировать в области повышения безопасности и эффективности Великобритании и стран-союзников.¹² *A. C. Cossor* внедрила инновации в области радаров, представив первые коммерческие радиолокационные системы для навигации самолетов в британские аэропорты. В 1961 году *Raytheon* приобрела компанию *A. C. Cossor*. В 1997 году эта новая компания была приобретена компаниями *Hughes Defence* и *Texas Instruments* и стала называться *Raytheon Systems Limited*.

6. Заключение

Ученым и инженерам Великобритании удалось решить проблему отставания в области ламповых технологий в течение нескольких лет, после начала Первой мировой войны. Этому способствовало привлечение ученых и инженеров к проведению соответствующих разработок, а также участие профильных компаний, таких как, Кавендишская лаборатория, компании *BTH*, *A. C. Cossor*, *Mullard*, *Osram* и др. Дальновидное финансирование правительством индустрии производства радиоламп обеспечило открытие и применение новых технологий. Существование нескольких мощных производителей, активно конкурирующих друг с другом, привело к тому, что британская конструкция и производство ламп стали соответствовать мировым стандартам. К началу 1926 года производство ламповых триодов стало настолько обыденным делом, что помимо крупных производителей, успех

¹² History Raytheon UK.

URL: <https://www.raytheon.co.uk/who-we-are/rtx-in-the-uk/history> (13.12.2025).

отрасли способствовал появлению множества крупных и мелких независимых фирм. Конечно, дальнейшая разработка ламповых технологий в Великобритании продолжалась и после 1926 года, появились многосеточные радиолампы, специальные преобразователи частоты для супергетеродинных схем и т. д., но, несмотря на все это, главный фундамент для дальнейшего прогресса был заложен в конце 10-х и начале 20-х годов XX века.

Список литературы

1. Vyse B. Marconi Osram Valve – extracts from “The Saga of Marconi Osram Valves.” Part 1: From the Beginning, the story up to 1919 // BVWS bulletin. Winter 1999. Vol. 24, no. 4. P. 19.
2. Wood S. Arrival of the Valve // Electronics World. March, 1992.
URL: <https://www.r-type.org/articles/art-221.htm> (13.12.2025).
3. X-ray Tube maker – A. C. Cossor, 1861–1922 : Notes by the late Derek Guttery // The Invisible Light – Journal of The British Society for the History of Radiology. Nov. 2009. No. 30. P. 20.
4. Bullimore W. R. An Improved Thermionic Valve for use more particularly in Wireless Telegraphy or Telephony. Patent GB192464. Complete Accepted: Jan. 31, 1923. Application Date : Oct, 31, 1921.
5. Bullimore W. R. Improvements in Thermionic Valves. Patent GB197853A. Complete Left: Aug, 25, 1922. Complete Accepted: May 24, 1923. Application Date: June 22, 1922.
6. Donisthorpe H. St. J. Thermionic Valve for Use in Wireless Telegraphy and Telephony. Patent US1391671A. Patented Sept. 27, 1931. Application filed March 23, 1921.
7. Valve Tests. The Cossor P. 1 and P. 2 Valves // Wireless World and Radio Review. October 22, 1924. Vol. 15, no. 4. P. 107–108.
8. P.2. The “PINK-TOP” Cossor // Amateur Wireless. August 4, 1923. Vol. 03, no. 61. P. 125.
9. Sanders I. L. The early Cossor Tin-hat valves (1922–1925) // Radio Bygones. April/May, 1997. URL: <https://www.r-type.org/articles/art-095.htm> (13.12.2025).

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.

Tube Triodes of the Cavendish Laboratory and Other British Companies

V. M. Pestrikov

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

pvm205@yandex.ru

Received: December 13, 2025

Peer-reviewed: December 20, 2025

Accepted: December 20, 2025

Abstract: *This article examines the organization of research and development of vacuum tube technology in Great Britain from the beginning of World War I to the mid-1920s. Early vacuum tube triode designs developed at the Cavendish Laboratory are examined, highlighting their shortcomings. An explanation is provided for the choice of the French R tube as the prototype for the serial production of British triodes by Osram-Robertson and BTH. Attention is paid to the development of high-power oscillator triodes by Marconi, which were used in 1922 in the transmitter of the first British broadcasting station, 2MT Writtle. An analysis is also provided of the significance of radio technologies developed by A. C. Cossor Limited, a leader in the early 1920s vacuum tube production in Great Britain.*

Keywords: *White valve, Marconi-Osram Valve Company, Cavendish Laboratory, BTH Company, 2MT Radio Station, A. C. Cossor Co., Cossor triode tube.*

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov, “Tube Triodes of the Cavendish Laboratory and Other British Companies,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 3, pp. 523–546, 2026, doi: 10.21227/9ven-0997. (In Russ.).

References

- [1] B. Vyse, “Marconi Osram Valve—extracts from ‘The Saga of Marconi Osram Valves’. Part 1: From the Beginning, the story up to 1919,” *BVWS bulletin*, Winter 1999, vol. 24, no. 4, p. 19.
- [2] S. Wood, “Arrival of the Valve,” *Electronics World*, March, 1992.
URL: <https://www.r-type.org/articles/art-221.htm> (13.12.2025).
- [3] “X-ray Tube maker – A. C. Cossor, 1861–1922: Notes by the late Derek Guttery,” *The Invisible Light – Journal of The British Society for the History of Radiology*, Nov. 2009, no. 30, p. 20.
- [4] W. R. Bullimore, “An Improved Thermionic Valve for use more particularly in Wireless Telegraphy or Telephony.” Patent GB192464. Complete Accepted: Jan. 31, 1923.
Application Date : Oct, 31, 1921.
- [5] W. R. Bullimore, “Improvements in Thermionic Valves.” Patent GB197853A. Complete Left: Aug, 25, 1922. Complete Accepted: May 24, 1923. Application Date: June 22, 1922.
- [6] H. St. J. Donisthorpe, “Thermionic Valve for Use in Wireless Telegraphy and Telephony. Patent US1391671A.” Patented Sept. 27, 1931. Application filed March 23, 1921.

- [7] “Valve Tests. The Cossor P. 1 and P. 2 Valves,” *Wireless World and Radio Review*, October 22, 1924, vol. 15, no. 4, pp. 107–108.
- [8] “P.2. The ‘PINK-TOP’ Cossor,” *Amateur Wireless*, August 4, 1923, vol. 03, no. 61, p. 125.
- [9] I. L. Sanders, “The early Cossor Tin-hat valves (1922–1925),” *Radio Bygones*, April/May, 1997. URL: <https://www.r-type.org/articles/art-095.htm> (13.12.2025).

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 654.1:93/94(075.4)

История испытаний систем радиолокации на Черноморском флоте. РЛС в составе управления ракетным оружием

Ермолов П. П.

*Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация
ppyermolov@sevsu.ru*

Получено: 6 декабря 2025 г.

Отрецензировано: 20 декабря 2025 г.

Принято к публикации: 20 декабря 2025 г.

Аннотация: В статье рассмотрена история испытаний на Черноморском флоте РЛС в составе управления ракетным оружием в 1957—1989 гг. Результаты исследования изложены в формате компендиума, сведены в таблицу и проиллюстрированы инфографикой.

Ключевые слова: ПК «П-15», ЗРК «Волхов», ЗРК «Волна», ЗРК «Шторм», «Аметист», ЗРК «Оса-М», ЗРК «Москит-Е», ЗРК «Оса-МА», ЗРК «Штиль», ЗРК «Кортик» (ЗМ87), ЗРК «С300Ф», ЗРК «Клинок», ЗРК «Кинжал».

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Ермолов П. П. История испытаний систем радиолокации на Черноморском флоте. РЛС в составе управления ракетным оружием // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2026. Т. 9, № 3. С. 547—559.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Ермолов, П. П. История испытаний систем радиолокации на Черноморском флоте. РЛС в составе управления ракетным оружием / П. П. Ермолов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2026. — Т. 9, № 3. — С. 547—559.

1. Введение

Черноморский флот стал полигоном для испытаний радиоэлектронных средств еще с начала 1-го периода¹ (в конце XIX в.), когда под руководством А. С. Попова в 1899 и 1901 гг. на ЧФ проводились первые в мировой практике испытания систем радиосвязи в условиях «практической

¹ Здесь и далее периодизация соответствует [1].

эскадры». В статье [2] с использованием методологии «компендиум — таблица — инфографика» (КТИ) [3] рассмотрена краткая предыстория развития радиолокации и история испытаний на Черноморском флоте РЛС общего обнаружения в четырех периодах: 1939—1940, 1941—1945, 1946—1964 и 1965—1986 гг. В статье [4] с использованием КТИ рассмотрена история испытаний на Черноморском флоте РЛС управления артиллерийским и торпедным оружием. В статье [5] с использованием КТИ рассмотрена история испытаний на Черноморском флоте навигационных РЛС, РЛС опознавания и приемопередатчиков РЛС. В настоящей статье с использованием КТИ рассмотрена история испытаний на Черноморском флоте РЛС в составе управления ракетным оружием.

2. 4-й период (1946—1964)

Первая противокорабельная ракета П-15 была разработана в 1955—1960 гг. В состав системы управления входила радиолокационная станция обнаружения цели и выработки координат. В качестве корабля-носителя ракет П-15 был принят торпедный катер проекта 183Э, на котором вместо торпедных аппаратов и кормовой артустановки 2М-3М (носовая сохранялась) монтировались две пусковые установки ангарного типа для ракет П-15. Первый пуск ракеты П-15 с катера проекта 183Э состоялся 16 октября 1957 г. на Черном море [6].

Для успешного проведения испытаний зенитного оружия было принято решение о создании испытательных и производственных баз в непосредственной близости от районов испытаний, что позволило существенно сократить сроки их проведения. Одна из таких испытательных баз («Ай-Петри») была создана в 1969 г. в Феодосии, а производственная база «Утес» — в Севастополе в 1973 г. [7].

Первые отечественные зенитные управляемые ракетные комплексы С-75 и С-125, предназначенные для ПВО страны, были созданы в 1956 и 1959 гг. соответственно. На корабль впервые зенитный ракетный комплекс впервые поставлен в 1958 г. — комплекс М2 («Волхов»). Он был создан на основе ЗРК С-75 и размещен на крейсере «Дзержинский» Черноморского флота, где прошел цикл испытаний. Однако ввиду своей громоздкости и недостаточно полного учета морской специфики этот комплекс в серийное производство запущен не был [7].

В основу разработки системы управления первого прошедшего успешные испытания корабельного ЗРК «Волна» были положены технические решения, используемые ранее при создании корабельных РЛС обнаружения и сопровождения воздушных целей «Фут-Б» и «Ангара». Ком-

плекс «Волна», работающий по целеуказаниям от РЛС «Ангара», решал не только задачи сопровождения цели, но задачи наведения ракет посредством радиокоманд. Опытный образец комплекса «Волна», установленный на эсминце «Бравый» Черноморского флота, в 1960—1962 гг. успешно прошел совместные испытания. Созданием ЗРК «Волна» было положено начало коренному перевооружению надводных кораблей ВМФ СССР [7].

3. 5-й период (1965—1990)

В 1961 г. были развернуты работы по созданию нового корабельного ЗРК «Шторм» с более высоким потолком поражения целей, повышенной надежностью и помехозащищенностью. Вначале были проведены испытания макета системы управления на Феодосийском полигоне, затем испытания опытного образца на опытовом корабле ОС-24. В октябре 1967 г. два первых серийных образца ЗРК «Шторм» прошли успешные испытания на головном противолодочном крейсере «Москва» Черноморского флота. Комплекс впоследствии был установлен на 22 боевых кораблях ВМФ СССР [7].

Первоначально разработка системы управления комплекса «Шторм» рассматривалась как модернизация системы управления комплекса «Волна». Однако уже самое начальное проектирование показало полную невозможность эволюционного преобразования. В результате следы наследственности сохранялись только в общей структуре СУ и в наименовании ряда ее приборов. Требования, предъявленные к разработке УЗРК «Шторм», были значительно повышены по сравнению с ЗРК «Волна». Это касалось увеличения в два раза дальности, повышения надежности и помехозащищенности. Целевых радиолокационных каналов осталось также два, но теперь каждый из них мог измерять все три координаты сопровождаемой цели. Каждый из этих двух каналов осуществлял измерение угловых координат цели двумя методами во взаимно перпендикулярных плоскостях — моноимпульсным и линейным сканированием. Примененные круглые, а не эллиптические антенны этих двух каналов были взаимно развернуты на 90° относительно их общей оси, что позволило иметь одновременно двойную (обзорную и моноимпульсную равносигнальную) информацию о цели. Всем этим были обеспечены как высокая устойчивость принятия целеуказаний и сопровождения целей операторами, так и полная защищенность СУ от ответных угловых помех. Известной трудностью, как и в предыдущих разработках, осталась задача борьбы с пассивными помехами для РЛС, так как на станции был использован магнетронный передатчик и обычная система селекции подвижных целей (СПЦ). Однако не-

приятного эффекта от воздействия метеообразований удалось все же избежать переводом обоих целевых каналов в более длинноволновую часть сантиметрового диапазона. Переход к более длинным волнам позволил также перейти от сплошных зеркал целевых каналов к решетчатым, что позволило снизить их парусность. Заново был разработан радиопередатчик канала команд (РПК) системы управления. Повышенная, предельно достижимая на тот период времени импульсная мощность, троичное кодирование и предельно низкая скважность полностью обеспечили повышение дальности действия комплекса, борьбу с интерференцией радиолинии команд над морской поверхностью и высокую защищенность приемника бортовой аппаратуры ракет. Структура системы управления комплекса и его аппаратурная реализация показали весьма высокие характеристики по точности работы, помехозащищенности и надежности, сохраняя при этом необходимые для корабельных средств компактность и простоту боевого и технического обслуживания [8].

В состав первого в мире противокорабельного ракетного комплекса с крылатой ракетой с подводным стартом «Аметист», в частности, входили радиовысотомер и радиолокационная головка самонаведения. Система самонаведения сама выбирала цель из нескольких обнаруженных, основываясь на анализе энергетических характеристик отраженных от целей сигналов и геометрических признаков расположения целей в полученной радиолокационной картине. Наряду со многими достоинствами ракета «Аметист» обладала и недостатками. В первую очередь — это малая дальность стрельбы, а также недостаточная помехозащищенность и избирательность бортовой системы управления. Кроме того, ракета не была универсальной — пуск производился только с подводной лодки и только в погруженном положении. Этап совместных испытаний проходил на Черном море на подводной лодке проекта 613А с марта 1965 г. по сентябрь 1966 г.²

В 1960 г. правительством было принято решение о разработке зенитных ракетных комплексов «Оса» и «Оса-М», соответственно для ПВО Сухопутных войск и ВМФ. Разработка ракет велась по единым тактико-техническим требованиям и существенных различий в их конструкции не было. В состав системы управления комплексов входили станции обнаружения целей, а также сопровождения цели и визирования ракет. Наведение ракет на цель осуществлялось радиокомандным методом. Радиолокационные системы комплекса работали в сантиметровом диапазоне и содержали устройства помехозащиты. В комплексе «Оса-М» был возможен также прием целеуказаний от корабельной системы обнаружения и целе-

² Информационно-новостная система «Ракетная техника» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://rbase.new-factoria.ru/> (дата обращения: 18.02.2015).

указаний. Отличительной особенностью комплекса «Оса-М» являлось то, что он самостоятельно мог решать задачу обнаружения целей, для чего в состав системы управления была включена радиолокационная станция, обеспечивающая обнаружение целей, летящих на высоте 3,5—4 км на дальности до 25—30 км и на больших высотах на дальности до 50 км. Координаты обнаруженной и опознанной цели поступали на станцию сопровождения, где использовались для наведения антенного поста по пеленгу и доиска цели по углу места. Благодаря совмещению режимов обнаружения и захвата цели на сопровождение в одной системе время реакции комплекса было сокращено на 6—8 секунд. При приближении ракеты к цели подавалась команда для взведения радиовзрывателя и снятия последней ступени предохранителя. По этой команде радиовзрыватель начинал излучать электромагнитные импульсы. При определенном уровне отраженных от цели сигналов происходил подрыв боевой части. По тактико-техническим требованиям предельный радиус срабатывания взрывателя — 15 м. В случае пролета ракеты мимо цели на ракету подавалась команда на отключение радиовзрывателя. Ракета выводилась к уровню воды и самоликвидировалась подрывом боевой части от часового механизма или разрушалась при ударе о воду. В 1967 г. начались испытания комплекса «Оса-М» на опытном судне ОС-24 пр. 33 Черноморского флота (бывший КР «Ворошилов»). Испытания были завершены в 1971 г. В 1973 г. ЗРК «Оса-М» был принят на вооружение ВМФ.

Усиление противоракетной обороны вероятного противника стимулировало создание ракетного оружия, способного успешно преодолевать систему ПВО корабля противника. Таким ЗРК стал «Москит-Е» со сверхзвуковой ракетой. Задача комплекса состояла в том, чтобы за счет максимально возможного снижения высоты полета и введения противозенитного маневра на конечном участке траектории не позволить противнику организовать противоракетную оборону. Натурные испытания комплекса «Москит-Е» проводились на Черноморском полигоне ВМФ в июне—октябре 1978 г., а позже на кораблях Черноморского и Северного флотов [7].

В 1975 г. была начата модернизация комплекса «Оса-М», который получил наименование «Оса-МА». В результате минимальная высота поражения цели уменьшилась с 60 до 25 м. Корабельные испытания модернизированного комплекса проводились на малом противолодочном корабле пр. 1124 на Черном море. В 1979 году комплекс «Оса-МА» был принят на вооружение.²

В 1972 г. начата разработка ЗРК коллективной обороны «Штиль». В отличие от комплексов «Волна» и «Шторм» в ЗРК «Штиль» использован метод полуактивного самонаведения ЗУР при облучении целей мощными

высокочастотными сигналами подсвета, излучаемыми средствами корабельной системы управления комплекса. ЗРК «Штиль» работал совместно с общекорабельной системой целеуказаний — РЛС «Фрегат-М», системой обработки информации «Байкал-Ф» и системой целераспределения «Аллея». Модульное построение комплекса и его системы управления позволило иметь различные комплектации в зависимости от проекта корабля. Предварительные испытания комплекса на БПК «Проворный» проводились на Черном море с ноября 1976 по декабрь 1977 г. Государственные испытания комплекса были проведены там же с июня 1978 по декабрь 1980 г. В 1983 г. комплекс средней дальности «Штиль» принят на вооружение кораблей ВМФ СССР [7].

Зенитный ракетно-артиллерийский комплекс ЗМ87 «Кортик» — комплекс самообороны надводных кораблей, предназначен для поражения целей ракетами на рубеже от 8000 до 1500 м, а затем дострела уцелевших целей 30-мм автоматами АО-18 на дистанции от 1500 до 500 м. Командный модуль ЗРК включал в себя радиолокационную станцию обнаружения целей и систему обработки информации, целераспределения и целеуказания. Боевой модуль состоял из ракетно-артиллерийской установки и системы управления, состоящей из радиолокационного и телевизионно-оптического канала. Система управления ракетой полуавтоматическая с радиокомандной линией связи. Взрыватель неконтактный с радиусом действия 5 метров. В 1983 г. опытный образец ЗМ87 был установлен на ракетном катере пр. 1241.7 «Молния» (бортовой № 952). Корабельные испытания комплекса проходили на Черном море. На вооружение комплекс ЗМ87 поступил в 1989 г.²

В 1969 г. правительство приняло решение о разработке многоканального зенитно-ракетного комплекса С-300 большой дальности для трех видов вооруженных сил: сухопутных, войск ПРО и Военно-Морского Флота. Впервые в этой разработке были применены фазированные антенные решетки (ФАР), позволяющие реализовать многоканальность комплекса. Был выбран вариант пассивной ФАР на фарадеевских фазовращателях, имеющих малые потери при управляемом фазовом сдвиге 720°. Большой фазовый сдвиг дал возможность предельно упростить цифровую часть аппаратуры системы управления лучом. Опытный образец ЗРК С-300Ф был установлен на БПК «Азов», опытные испытания проводились на Черноморском полигоне. Государственные испытания комплекса завершились в 1983 г. [7].

Автономный всепогодный зенитный ракетно-артиллерийский комплекс «Клинок» являлся первым многоканальным огневым средством самообороны кораблей ВМФ. Комплекс предназначался для борьбы с по-

явившимися на вооружении вероятного противника средствами массового нападения — малоразмерными низколетящими противокорабельными крылатыми ракетами (ПКР), а также с пилотируемыми средствами воздушного нападения (СВН), атакующими корабль на средних и малых высотах. Собственная система обнаружения комплекса «Клинок» обеспечивала ему полную независимость и возможность оперативно действовать в самой сложной обстановке: комплекс самостоятельно обнаруживал и отражал массированные налеты СВН, в том числе низколетящих ПКР. Система обнаружения построена на базе РЛС кругового обзора «Позитив». Комплекс «Клинок» автоматически или с помощью оператора из всей совокупности поступающей информации выбирал наиболее опасные цели и производил обстрел с наведением на каждую цель до трех ЗУР. Допойск, захват и сопровождение последующих целей производился автоматически. Радиолокационные средства комплекса защищены от активных и пассивных помех. В сложной помеховой ситуации использовались резервные телевизионно-оптические средства, обеспечивающие сопровождение цели в полуавтоматическом режиме с помощью телевизоров. Многоканальность ЗРК по целям и ракетам достигалась применением в системе управления фазированной антенной решетки с электронным управлением луча и быстродействующего вычислительного комплекса с развитым программным обеспечением на базе мультипрограммной двухмашинной обработки информации в реальном масштабе времени. Захват ответного сигнала ракеты на начальном участке и вывод на кинематическую траекторию осуществляли две малые фазированные антенные решетки, последовательно передавая его из широкого в средний, а затем в узкий луч основной ФАР для наведения ЗУР посредством команд управления. Основной объем работ по отработке СУ и комплекса в целом был выполнен на полигоне Черноморского флота. В 1986 г. государственные испытания опытного образца комплекса на корабле проекта 1124К были успешно завершены и опытный образец передан в эксплуатацию.

ЗРК «Кинжал» — это многоканальный, всепогодный, автономный зенитный ракетный комплекс ближней обороны, способный отражать массированный налет низколетящих противокорабельных, противорадиолокационных ракет, управляемых и неуправляемых бомб, самолетов, вертолетов и т. п. Способен действовать по надводным кораблям и экранопланам противника. Устанавливался на кораблях различных классов водоизмещением более 800 т. Подрыв боевой части ракеты осколочно-фугасного типа производился по команде импульсного радиовзрывателя в непосредственной близости от цели. Радиовзрыватель помехозащищен и адаптируется при подходе к водной поверхности. ЗРК «Кинжал» оснащен соб-

ственными радиолокационными средствами обнаружения, обеспечивающими комплексу полную независимость и оперативные действия в самой сложной обстановке. Основой многоканальности комплекса являются ФАР с электронным управлением луча и быстродействующий вычислительный комплекс, основной режим работы которого — автоматический (без участия личного состава), основанный на принципах «искусственного интеллекта». Встроенные в антенный пост телевизионно-оптические средства обнаружения целей повышают его помехозащищенность в условиях интенсивного радиопротиводействия. Радиолокационные средства комплекса обеспечивают дальность обнаружения воздушных целей 45 км на высоте 3,5 км. Время реакции комплекса составляет от 8 до 24 секунд в зависимости от режима РЛС. Кроме ЗУР система управления огнем комплекса «Кинжал» может управлять огнем 30-мм автоматов АК-360М, производя дострел уцелевших целей на расстоянии до 200 метров. Корабельные испытания комплекса были начаты в 1982 г. на Черном море на малом противолодочном корабле пр. 1124. ЗРК «Кинжал» был официально принят на вооружение только в 1989 г.²

Самые общие сведения об испытаниях на Черноморском флоте РЛС в составе комплексов ракетного оружия за период 1957—1989 гг. приведены в таблице 1. С использованием средств инфографики эти данные отображены на рис. 1.

Таблица 1. Сведения об испытаниях на Черноморском флоте РЛС в составе комплексов ракетного оружия.

Table 1. Information on tests of radars as part of missile weapon systems in the Black Sea Fleet

№ п/п	Наименование	Год испытаний	Носитель или место испытаний	РЛС	Основные особенности
1.	ПК «П-15»	1957	ТК проекта 183Э ЧФ	—	Первый противокорабельный комплекс
2.	ЗРК «Волхов»	1958	КР «Дзержинский» ЧФ	—	Первый зенитный комплекс. Громоздкость, плохой учет морской специфики
3.	ЗРК «Волна»	1962	ЭМ «Бравый» ЧФ	«Ангара»	Наведение ракет посредством радиокоманд
4.	ЗРК «Шторм»	1961 1967	Феодосийский полигон ПК «Москва» ЧФ	—	Более высокий потолок поражения целей, повышенная надежность и помехозащищенность
5.	«Аметист»	1966	ПЛ проекта 613А ЧФ	—	Первый в мире противокорабельный ракетный комплекс с крылатой ракетой с подводным стартом

№ п/п	Наименование	Год испытаний	Носитель или место испытаний	РЛС	Основные особенности
6.	ЗРК «Оса-М»	1971	ОС-24 пр. 33 (бывший КР «Ворошилов») ЧФ	—	Самостоятельное обнаружение целей с использованием РЛС
7.	ЗРК «Москит-Е»	1978	Черноморский полигон ВМФ	—	Использование сверхзвуковой ракеты; максимальное снижение высоты полета и введение противозенитного маневра на конечном участке траектории
8.	ЗРК «Оса-МА»	1979	Малый противолодочный корабль пр. 1124 ЧФ		Уменьшение минимальной высоты поражения цели с 60 до 25 м
9.	ЗРК «Штиль»	1980	БПК «Проворный» ЧФ	«Фрегат-М»	Использован метод полуактивного самонаведения ЗУР при облучении целей высокочастотными сигналами подсвета
10.	ЗРК «Кортик» (ЗМ87)	1983	Ракетный катер пр. 1241.7 «Молния» ЧФ	—	Введение телевизионно-оптического канала; использование неконтактного взрывателя с радиусом действия 5 м
11.	ЗРК «С300Ф»	1983	БПК «Азов» ЧФ	—	Применение пассивной ФАР на фарадеевских фазовращателях
12.	ЗРК «Клинок»	1986	Малый противолодочный корабль проекта 1124 ЧФ	«Позитив»	ФАР с электронным управлением луча
13.	ЗРК «Кинжал»	1989	Малый противолодочный корабль пр. 1124 ЧФ	—	ФАР с электронным управлением луча, быстродействующий вычислительный комплекс с использованием принципов «искусственного интеллекта»

4. Заключение

Для РЛС в составе комплексов ракетного оружия, которые проходили испытания на Черноморском флоте в 1957—1989 гг., характерны: наведение ракет на цель посредством радиокоманд; повышение потолка поражения целей, надежности и помехозащищенности; осуществление пуска противокорабельной крылатой ракеты с подводным стартом; реализация режима самостоятельного обнаружения целей с использованием РЛС; максимальное снижение высоты полета и введение противозенитного маневра на конечном участке траектории; уменьшение минимальной

высоты поражения цели с 60 до 25 м; использование метода полуактивного самонаведения ЗУР при облучении целей высокочастотными сигналами подсвета; введение телевизионно-оптического канала; использование неконтактного взрывателя с радиусом действия 5 м; применение пассивной ФАР на фарадеевских фазовращателях с электронным управлением луча и использование быстродействующего вычислительного комплекса с использованием принципов «искусственного интеллекта».

Анализ инфографики (рис. 1), выполненной на основе рекомендаций [3], показывает, что испытания РЛС в составе управления ракетным оружием на Черноморском флоте достаточно хорошо отражены в открытых источниках за период 1957—1989 гг.

Список литературы

1. Ермолов П. П. Периодизация и основные объекты в истории исследований по радиотехнологиям в Крыму. В сб. : 17-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2007) : материалы конф. в 2 т. (Севастополь, 10—14 сент. 2007). Севастополь : Вебер, 2007. Т. 1. С. 39—44.
2. Ермолов П. П. История испытаний систем радиолокации на Черноморском флоте. РЛС общего обнаружения // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2025. Т. 8, № 4. С. 666—686.
3. Ермолов П. П. Инфографика — важный инструмент визуализации и снижения размерности контента в историографии науки и техники // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2025. Т. 8, № 1. С. 124—151.
4. Ермолов П. П. История испытаний систем радиолокации на Черноморском флоте. РЛС управления артиллерийским и торпедным оружием // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2026. Т. 9, № 1. С. 152—166.
5. Ермолов П. П. История испытаний систем радиолокации на Черноморском флоте. Навигационные РЛС, РЛС опознавания и приемопередатчики РЛС // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2026. Т. 9, № 2. С. 350—365.
6. 60 лет НПО «Алмаз» : победы и перспективы / под ред. А. А. Леманского. М. : Унисерв, 2007. 558 с.
7. Щербаков Н. С. Флагман отечественного морского приборостроения. К 75-летию ОАО «Морской научно-исследовательский институт радиоэлектроники Альтаир» // История науки и техники. 2008. № 8. С. 2—17.
8. Радиолокационное вооружение Военно-Морского Флота России : сборник статей / Под ред. И. И. Тынянкина и В. Ф. Измайлова. М. : Научтехлитиздат, 2005. 446 с.

Сведения об авторе

Ермолов Павел Петрович, кандидат технических наук, доцент, профессор Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID: 0000-0001-9089-974X.

СВЕДЕНИЯ ОБ ИСПЫТАНИЯХ
НА ЧЕРНОМОРСКОМ ФЛОТЕ РЛС В СОСТАВЕ
КОМПЛЕКСОВ РАКЕТНОГО ОРУЖИЯ

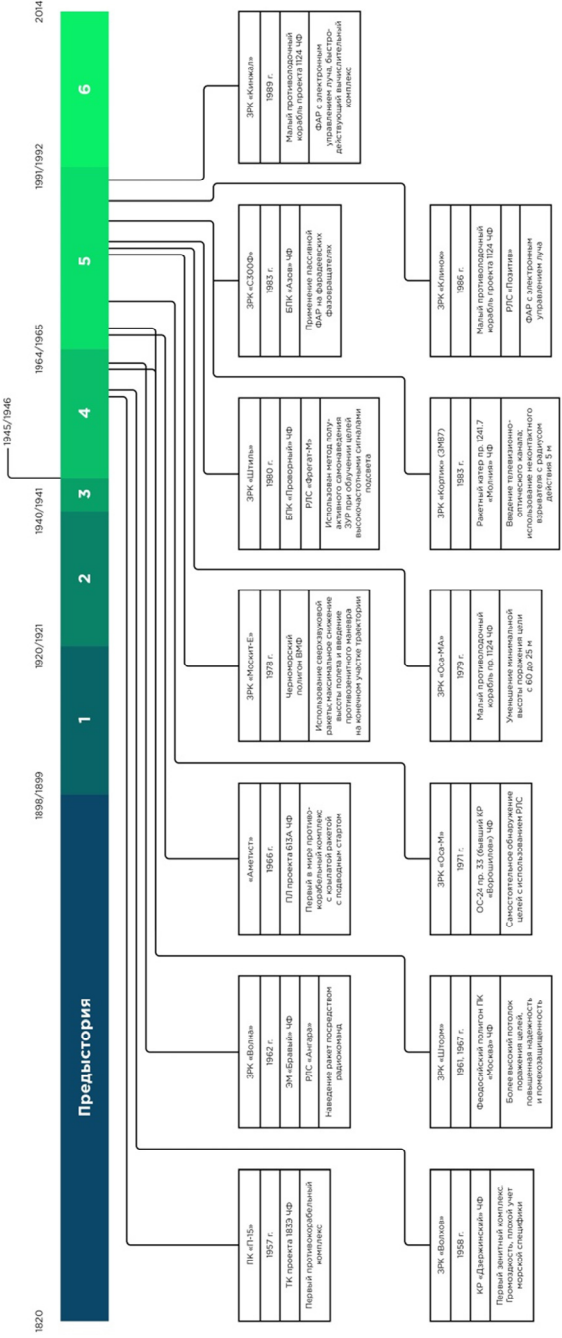


Рис. 1. – Fig. 1.

History of Testing of Radar Systems in the Black Sea Fleet. Radar as Part of Missile Weapons Control

P. P. Yermolov

Sevastopol State University
33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation
ppyermolov@sevsu.ru

Received: December 6, 2025

Peer-reviewed: December 20, 2025

Accepted: December 20, 2025

Abstract: This article examines the history of radar testing in the Black Sea Fleet as part of missile weapons control from 1957 to 1989. The research results are presented in a compendium format, summarized in a table, and illustrated with infographics.

Keywords: “P-15”, “Volkhov”, “Volna”, “Shtorm”, “Ametist”, “Osa-M”, “Moskit-Ye”, “Osa-MA”, “Shtil’”, “Kortik” (ZM87), “S300F”, “Klinok”, “Kinzhal”.

For citation (IEEE): P. P. Yermolov, “History of Testing of Radar Systems in the Black Sea Fleet. Radar as Part of Missile Weapons Control,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 3, pp. 547–559, 2026, doi: 10.21227/f3gz-7y64. (In Russ.).

References

- [1] P. P. Yermolov, “Periodization and main objects in the history of research on radio technology in Crimea,” in *17th International Crimean Conf. “Microwave and Telecommunication Technology” (CriMiCo’2007)*, Sevastopol, September 10–14, 2007, Sevastopol: Weber, pp. 39–44, 2007. (In Russ.).
- [2] P. P. Yermolov, “History of Testing of Radar Systems in the Black Sea Fleet. General Detection Radar,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 8, no. 4, pp. 666–686, 2025, doi: 10.21227/gwkd-f371. (In Russ.).
- [3] P. P. Yermolov, “Info Graphics Are an Important Tool for Visualization and Dimensionality Reduction in the Historiography of Science and Technology,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 8, no. 1, pp. 124–151, 2025. (In Russ.).
- [4] P. P. Yermolov, “History of Testing of Radar Systems in the Black Sea Fleet. Artillery and Torpedo Weapon Control Radar,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 1, pp. 152–166, 2026. (In Russ.).
- [5] P. P. Yermolov, “History of Testing of Radar Systems in the Black Sea Fleet. Navigation Radars, Identification Radars and Radar Transceivers,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 2, pp. 350–365, 2026. (In Russ.).
- [6] Yu. A. Bakalenko, G. S. Baskakov, Polonsky S. I., and A. S. Romanovsky, *History of the creation and development of naval radar (before 1955)*, Moscow: USSR Ministry of Defense, 1990. (In Russ.).

- [7] *Radar weapons of the Russian Navy: a collection of articles*, ed. I. I. Tynyankin and V. F. Izmailov. Moscow: Naughtekhlitizdat, 2005. (In Russ.).

Information about the author

Pavel P. Yermolov, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Institute of Radio Electronics and Intelligent Technical Systems of Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-9089-974X.