

УДК 621.3.09

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН СВЕРХНИЗКИХ ЧАСТОТ В ЗЕМНОЙ
КОРЕ И ВОЛНОВОДЕ «ЗЕМЛЯ-ИОНОСФЕРА», ВЫПОЛНЕННЫХ
ИНСТИТУТОМ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ
ИМ В. А. КОТЕЛЬНИКОВА РАН**

А. М. Рязанцев

**Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
РАН, 141190, Московская область, г. Фрязино, пл. академика Введенского, д.1**

Статья поступила в редакцию 24 ноября 2017 г.

Аннотация. Представлены оригинальные результаты экспериментальных исследований распространения электромагнитных волн сверхнизкочастотного диапазона в земной коре и волноводе «Земля-ионосфера», выполненных Фрязинским филиалом Института радиотехники и электроники им В. А. Котельникова Российской Академии Наук. Исследования подземного распространения радиоволн проводилось на четырех полигонах на территории Европейской части Советского Союза. Измерения радиосигналов в волноводе «Земля-ионосфера» проводилось в четырех пунктах на расстояниях 4700 -10300 километров от передатчика.

Ключевые слова: земная кора, волновод «Земля-ионосфера», электромагнитные волны, сверхнизкие частоты (СНЧ).

Abstract. Brief revue of results of experimental research of propagation of extremely low frequency (ELF) waves in Earth core and waveguide Earth-ionosphere made by Fryazino branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Science (IRE RAS) is presented. The article consists of three parts: list of theoretical and technical problems for research and development of ELF systems, results of experimental research of propagation of electromagnetic waves in Earth core, results of measurements ELF signals in waveguide Earth-ionosphere. Experimental researches of propagation of ELF electromagnetic waves in Earth core

were conducted in four regions of Soviet Union: on the Baltic crystalline shield (Murmansk region and Leningrad region), Ukrainian crystalline shield (Zhitomir region), the Voronezh crystalline massive (Voronezh region). Parameters of experimental sites: thickness of sediment layer – about 200 meters, number parts for research – 11, distances between transmitting antenna and receiving antenna – 5-35 km, depth of boreholes – 600 -1000 m, borehole antennas – isolated wire with grounding, power of transmitter – 10-10 000 W, integral receiving signals time – 0,1 -120 s. As a result of measurements attenuation of electromagnetic waves in Earth core and electrical conductivity of crystalline rocks were defined.

Measurements of ELF signals transmitted by experimental transmitter system were conducted in four regions of Soviet Union: on the east coast of Baikal lake, on the east coast of Caspian Sea, Near Nakhodka port, on the south coast of Sakhalin island.

Parameters of measurement conditions: integral receiving signals time – 120 s, type of receiving antennas – magnetic and grounded wire, objects of measuring: signal of ELF transmitter, electrical and magnetic fields of atmospheric noise. ELF signals were received in 1th and 4th region only, in 2th and 3th regions atmospheric noises were higher than signal. Results of measuring obtained by IRE RAS in 1978-1979 is compared with results of measuring by Stanford University (USA) made in 1990 year.

Key words. Earth's crust, waveguide Earth-ionosphere, electromagnetic waves extremely low frequency (ELF).

1. Введение

В начале 60-х годов 20-го столетия перед научными учреждениями СССР и США была поставлена задача по созданию систем передачи информации на объекты, погруженные в землю и морскую среду на глубину нескольких сотен метров. Существующие системы передачи информации «поверхность Земли - подводный объект» в диапазоне сверхдлинных волн (диапазон частот 3000-30000 Гц) обеспечивали передачу информации на подводные объекты на

глубинах до 30 метров. Это было обусловлено ослаблением электромагнитного поля в морской воде с высокой электрической проводимостью - в среднем 4 См/м. Снижение ослабления до значений, позволяющих передавать информацию на подводные объекты, находящиеся в воде на глубинах сотен метров, обеспечивалось снижением частоты электромагнитного поля до десятков герц (по международной классификации диапазон сверхнизких частот (СНЧ). Реализация СНЧ систем передачи информации на подводные объекты потребовала создания мощных передающих устройств с горизонтальными электрическими антеннами значительных размеров. Возбуждаемые антенной электромагнитные СНЧ радиоволны распространялись в волноводе «Земля – ионосфера» с незначительным ослаблением (0,5 - 1,0 дБ/1000 км), что позволяло обеспечить глобальную систему передачи информации для объектов на поверхности Земли или воды и в воде.

К исследованиям СНЧ систем передачи информации были привлечены коллективы институтов и научных учреждений Академии Наук СССР и ряда министерств, выделены значительные финансовые и материальные ресурсы. В данной публикации приведены результаты измерений электромагнитных полей СНЧ диапазона в земной коре и волноводе «Земля-ионосфера», проведенных Фрязинским филиалом Института радиотехники и электроники им В. А. Котельникова РАН (далее ФИРЭ РАН).

Анализы научно-технических публикаций по результатам исследований подземного канала радиосвязи и созданию подземных систем радиосвязи представлены в обзорах [1,2], анализу проблем радиосвязи с погруженными в морскую воду объектами посвящен обзор [3].

2. Перечень направлений научно-технических исследований ФИРЭ РАН.

Перечень направлений по изучению подземной и подводной радиосвязи приведен в Таблице 1.

Таблица 1.

Научные направления исследований ФИРЭ РАН по созданию систем радиосвязи в проводящих средах.

среда	тип исследований	направление исследований
земная кора	электромагнитные модели земной коры, теоретические расчеты ЭМП для слоистых моделей сред [1], [2]	— трехслойная плоская модель земной коры, — волноводные модели земной коры, — теоретические расчеты ЭМП для плоской трехслойной модели и волноводных моделей земной коры,
	Экспериментальные исследования распространения электромагнитных волн в земной коре	измерения в 4-х районах СССР на тектонических платформах
морская среда	Расчеты ЭМП, возбуждаемых передающей СНЧ антенной, в волноводе «Земля-ионосфера»; измерение возбуждаемых СНЧ полей и помех в 5 регионах СССР ; расчет и измерение электромагнитных шумов антенн в морской воде.	Расчеты ЭМП полей в плоском и сферическом волноводах «Земля – ионосфера» [3]. измерения СНЧ полей и помех в 5 регионах СССР [5], [6], [8]. — шумы, наведенные в линейной электрической антенне при перемещении в турбулентной водной среде [3]. — шумы магнитных антенн за счет вибрации в магнитном поле Земли. — приэлектродные шумы электрических антенн с заводнение в морской воде [7].
	Дифракция СНЧ полей в морской среде	физическое моделирование дифракции ЭМП на металлических телах в морской воде [9].

3. Экспериментальные исследования подземных СНЧ каналов передачи информации подземного радиоканала

Схема проведения измерений приведена на рис. 1[2].

В двух скважинах (разведочных или специально пробуренных для экспериментов) размещались передающая и приемная антенны. Конструкция антенны определялась конструктивными особенностями скважин (наличие обсадной металлической трубы на всей толщине осадочных пород и минерализованной воды по всей глубине бурения скважины), а также

электродинамическими требованиями к антенне. Электрические скважинные антенны состояли из изолированного провода по всей глубине скважины, с заводнением (заземлением) нижнего конца провода. Наличие заземления и экранной оболочки кабеля позволяет снизить входное сопротивление антенн.

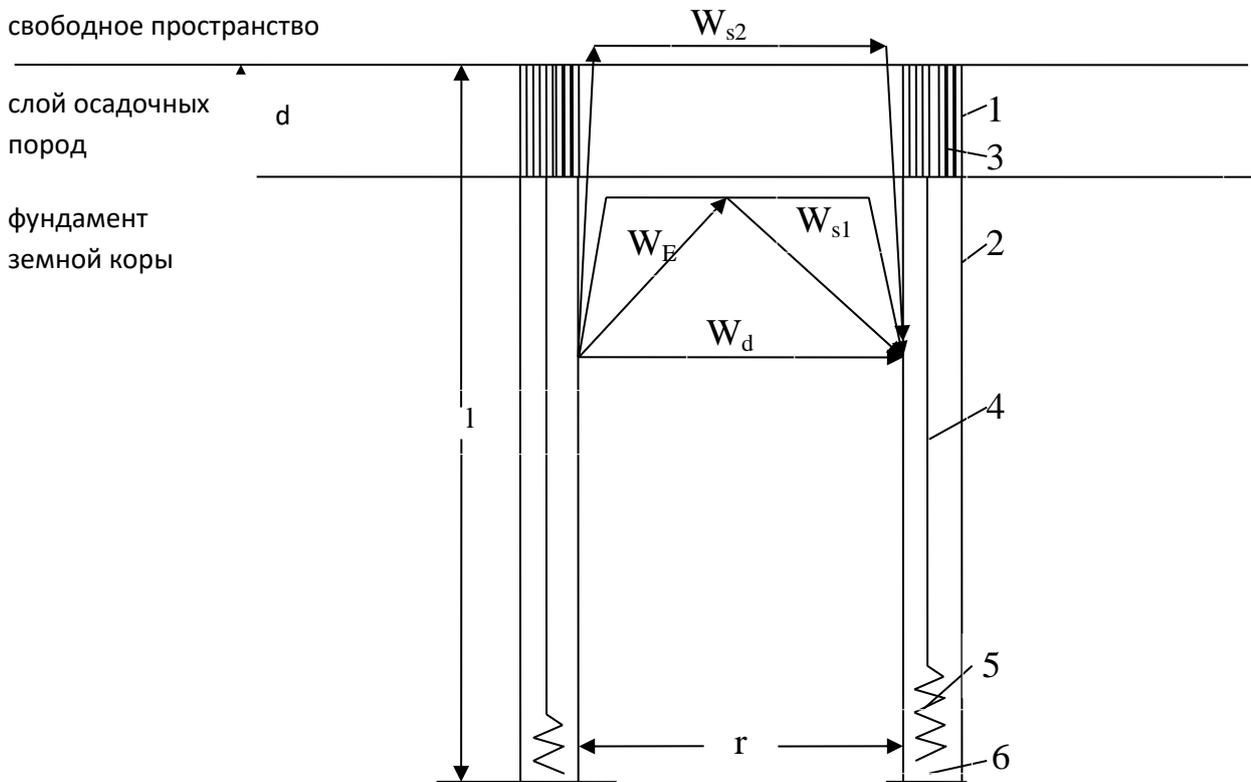


Рис. 1. - основная схема измерений параметров подземного радиоканала
 1 – обсадная труба, 2 – экранная оплетка кабеля, 3 – скважина,
 4 - изолированный провод антенны, 5 – заводнение антенны,
 6 – минерализованная вода в скважине. W_d, W_E, W_{s1}, W_{s2} –компоненты электромагнитного поля.

В качестве передатчика применялась автономная электроразведочная станция с выходной мощностью до 10 кВт и возможностью согласования выходного сопротивления передатчика с входным сопротивлением скважинной антенны. Основные требования к приемнику: - диапазон частот от единицы герц до нескольких килогерц; - высокая чувствительность; - регулируемое время накопления принимаемого сигнала от единиц до 1000 секунд.

В Таблице 2 приведён список четырех полигонов где проведены исследования на трех геологических платформах европейской части Советского

Союза: - Балтийском щите; - Украинском щите; - Воронежском кристаллическом массиве.

Расстояние между скважинами изменялись от нескольких км до порядка 20 км (в Воронежской области максимальный разнос скважин достигал 35 км).

Таблица 2.

Дислокация и основные параметры полигонов по изучению подземного распространения радиоволн.

Условный номер полигона	Дислокация полигона на геотектонических платформах	Толщина осадочного слоя, м	Глубина скважин, м
1	Балтийский щит (Мурманская область)	5-20	до 400
2	Балтийский щит (Ленинградская область)	~200	до 600
3	Украинский кристаллический щит (Житомирская область)	до 200	до 600
4	Воронежский кристаллический массив (Воронежская область)	200	до 1000

На Рис. 2 приведены экспериментальные графики амплитудно-частотных характеристик межскважинного просвечивания на частотах 10-1000 Гц в Воронежской области при разnose антенн 9 км и 14 км.

Ниспадающие участки графиков позволяют оценить усредненную электрическую проводимость пород фундамента σ_1 по инженерной формуле [4]:

$$\sigma_1 = \left[\frac{500 \ln \left(\frac{E_1 \cdot f_2}{E_2 \cdot f_1} \right)}{r(\sqrt{f_2} - \sqrt{f_1})} \right] \quad (1)$$

В выражении (1) приняты обозначения:

f_1, f_2 - нижняя и верхняя частоты анализируемого частотного участка АЧХ,

ε_{A1} и ε_{A2} – значения наводимых напряжений в антенне на нижней (f_1) и верхней (f_2) частотах.

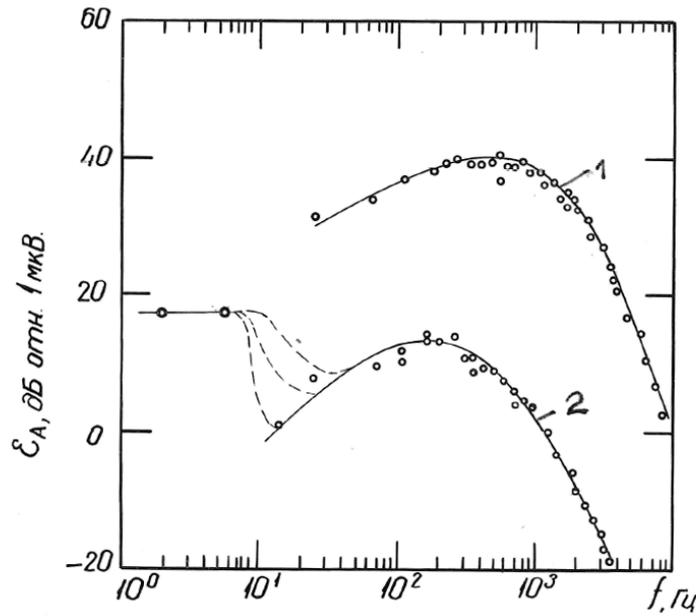


Рис. 2. - Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) межскважинного просвечивания. 1- $r=9$ км, 2- $r=14$ км; E_A –наводимое напряжение в приемной антенне.

Вычисленные значения проводимости фундамента земной коры приведены в Таблице 3

Таблица 3.

Среднее значение электрической проводимости пород фундамента σ_1 в Воронежской области.

параметр r , км	14			9	
$f_1, \text{Гц}/f_2, \text{Гц}$	225/525	525/925	925/3525	2025/4025	4025/7025
$\sigma_1, \text{См/м}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$

Из экспериментальных амплитудно-частотных характеристик коэффициента передачи между подземными антеннами определены диапазон рабочих частот передачи информации, погонное ослабление электромагнитных полей, эффективное значение электрической проводимости пород фундамента земной коры. Значения электрической проводимости пород на экспериментальных трассах попадают в область значений $10^{-3} - 3 \cdot 10^{-5}$ См/м.

4. Распространение радиоволн СНЧ диапазона в волноводе «земля – ионосфера»

Многочисленные теоретические исследования и расчёты показали, что ослабление радиоволн на частотах менее 100 Гц, в волноводе «Земля-ионосфера» для различных моделей ионосферы лежит в пределах 0,5-1,0 дБ на 1000 км. Эти значения ослабления СНЧ радиоволн подтверждали, измерения спектров атмосферных помех, возбуждаемых в волноводе молниевыми разрядами. Значения ослабления радиоволн в волноводе, зависимость ослабления от времени суток, времени года и др. невозможно определить с достаточной точностью при отсутствии передающего источника с контролируемыми параметрами: типа передающие антенны, тока в антенне, диаграммы направленности антенны, освещенности трассы между передающей и приемной антеннами.

Это стало возможным после ввода в эксплуатацию передающих комплексов в СССР и США. Были созданы антенны на основе многокилометровой однопроводной линии на поверхности Земли с низкой электрической проводимостью фундамента земли. Две отечественные антенны располагались на Кольском кристаллическом массиве [10]. Первый экспериментальный передающий комплекс был создан на основе многопроводной высоковольтной линии электропередачи длиной 20 км «Кола-Серебрянка». В антенну подавался гармонический ток силой более 200 А на нескольких фиксированных частот в диапазоне 45-200 Гц.

На основе опыта создания и эксплуатации экспериментального передающего СНЧ комплекса был спроектирован и введён в эксплуатацию передающий комплекс «Зевс» [10], [11], [12].

ФирЭ РАН в 1978-1979 гг. проводил измерение СНЧ сигналов в 5 регионах СССР (Таблица 4). Измерялись уровни сигналов от экспериментального передатчика, отношение сигнал/шум, спектры помех. Время накопления принимаемого сигнала в большей части сеансов приёма составляла 120 секунд. Горизонтальное магнитное поле измерялась магнито-

индукционной антенной, горизонтальное электрическое поле - электрической антенной на основе проводной линии, заземлениями на обоих концах, длиной десятки метров.

Таблица 4.

Дислокация пунктов ФИРЭ РАН по приему сигналов СНЧ передатчика.

Условный номер пункта	Географический район размещения приемного пункта	Расстояния до СНЧ передатчика, км	Измеряемые параметры
1	Восточный берег озера Байкал	6800	Горизонтальные компоненты электрического и магнитного полей сигнала и помех в диапазоне частот 10-200 Гц
2	Южная оконечность острова Сахалин	10400	Горизонтальные компоненты магнитных полей сигнала и помех в диапазоне частот 10-500 Гц
3	30 км восточнее порта Находка	10300	Горизонтальные компоненты магнитных полей сигнала и помех в диапазоне частот 10-100 Гц
4	Восточное побережье Каспийского моря	4700	Горизонтальные компоненты магнитных полей сигнала и помех в диапазоне частот 10-100 Гц
5	Ленинградская область	1350	Вертикальное электрическое поле в фундаменте Земли при измерении в скважине

Результаты измерений СНЧ полей, выполненных ФИРЭ РАН приведены в Таб. 5. Для сравнения в таблице приведены результаты измерений сигналов СНЧ передатчика «Зевс», выполненных Стэнфордским Университетом (США) в 1990 г.

Таблица 5.

Результаты измерений сигналов в волноводе «Земля-ионосфера»,
возбуждаемых отечественными СНЧ передатчиками.

передатчик						
тип	экспериментальный			Зевс		
- длина антенны, км	20			60		
- величина тока, А	Более 200			200-300		
диапазон частот, Гц	40-220			20- 220		
магнитный момент $A \cdot m^2$	$\sim 3 \cdot 10^{10}$			$1,1 \cdot 10^{11}$		
приемное устройство						
организация, проводившая измерения, год	ФирЭ РАН 1978-1979			Стэндфордский университет, 1990		
измеряемые параметры	горизонтальные составляющие магнитного поля сигнала и помех			горизонтальной составляющей магнитного поля сигнала и помех		
частота сигнала, Гц	76			82		
время накопления сигнала, с	120			120		
результаты измерений						
параметр						
	г, км	с/ш, дБ	$\frac{N_0, A}{m \cdot Гц}$	г, км	с/ш	$\frac{N_0, A}{m \cdot Гц}$
	4700	<0	~ -120	3200	24,9	-139,7
	6800	20	-138	8100	<1,5	-136,4
	10300	<0	-120	16500	13,0	-134,
	10400	9	-120	18300	9,4	-140,5

В разделе «результаты измерений» Таб. 5 приведены значения спектральных плотностей атмосферных помех N_0 , А/м*Гц (усредненных по результатам анализа шумов в диапазоне 20-100 Гц для отечественных измерений [6] и на частоте 82 Гц для измерений Стэндфордского университета [13]). Минимальные значения шумов в СНЧ диапазоне

наблюдались на берегу о. Байкал и южной оконечности острова Сахалин. Помехи вблизи порта Находка и города Красноводска на 20-30 дБ выше минимальных помех на о. Байкал, что, объясняется существенным вкладом индустриальных помех больших индустриальных центров.

Отношения сигнал/шум чрезвычайно чувствительны к уровню атмосферных шумов, который зависит от времени года, суток, географических координат и др. [3, 5, 6, 8].

5. Заключение

Итогами научно-технической деятельности ФИРЭ РАН по изучению распространения радиоволн СНЧ диапазона в земной коре и волноводе «Земля-ионосфера» явились:

1. Создан мобильный приемный комплекс на базе серийной измерительной техники, разработанных программных средств для алгоритмов обработки сигналов, антенн электрического и магнитного типов, позволивший измерять электроромангнитные поля в атмосфере и земной коре.

2. Для 11 экспериментальных подземных трасс измерены амплитудно-частотные характеристики коэффициента передачи СНЧ сигнала между скваженными антеннами, из которых рассчитана эффективная электрическая проводимость пород фундамента земной коры; все значения электрической проводимости укладываются в диапазон значений $5 \cdot 10^{-4}$ - $3 \cdot 10^{-5}$ См/м.

Показано, что подземные системы радиосвязи могут быть развернуты на кристаллических щитах, где толщина осадочных пород составляет сотни метров и наиболее вероятная дальность связи не превышает 20 км при скорости передачи информации в пределах от долей до десятков бит/с; по технологическим и финансовым требованиям создание систем подземной связи вне кристаллических щитов маловероятно.

Показано, что существование волноводов в толще земной коры с электрической проводимостью менее 10^{-7} См/м нереально.

3. Показано, что на расстояниях до 10000 км экспериментальные значения электрического и магнитного полей соответствуют теоретическим значениям

при распространении СНЧ электромагнитных волн в плоском волноводе «Земля-ионосфера».

Статические характеристики атмосферных помех в СНЧ диапазоне зависят от многих факторов: времени года, времени суток, удалении места измерений от зон грозовой активности, промышленных шумов и других параметров.

Односторонний принцип передачи информации от СНЧ передатчика до приемника абонента, большой диапазон изменения параметров помех не позволяют прогнозировать отношение сигнал/шум в приемнике и достоверность передачи информации, что существенно снижает практическое применение СНЧ систем радиосвязи.

Созданный СНЧ передающий комплекс стал важным инструментом для изучения земной коры и ионосферы Земли, что показало его активное использование в 90-е годы.

Литература

1. А. М. Рязанцев, А. В. Шабельников. Распространение радиоволн в земной коре (обзор). *Радиотехника и электроника*. 1965. Т-10, №11, с. 1923 – 1940.
2. Е. В. Зверева, А. М. Рязанцев, И. Н. Самуйлов, Д. Н. Шахсуваров. Изучение распространения электромагнитных волн в земной коре. Сборник «Распространение радиоволн». Ответственный редактор М. А. Колосов, Издательство «Наука». 1975. с. 312-354.
3. В. В. Акиндинов, В. И. Нарышкин, А. М. Рязанцев. Электромагнитные поля в морской воде (обзор). *Радиотехника и электроника*. 1976. т. 21, №5. с. 914 – 944.
4. Gabillard R., Degauque P., Wait J. *JEEE transaction on communication* 1970, com. – 19, №6.
5. Л. А. Зайцева, Э. Г. Назаренко, Н. Н. Тететкин , В. Т. Серебряков. Исследования колебаний естественно электромагнитного поля в диапазоне сверхнизких частот (обзор). Препринт №110. 1973. ИРЭ АН СССР, с. 60.
6. В. В. Акиндинов, А.С. Гугин, М. С. Кисляков, В. Г. Максименко, Л. А. Потапова, А. М. Рязанцев, В. Т. Серебряков, Н. Н. Тететкин,

- Ю. Б. Башкуев. Вариации естественного электромагнитного поля в Бурятской АССР и Приморском крае. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1980. №6. с. 1129-1131.
7. В. В. Акиндинов, И. В. Лишин, В. Г. Максименко. Шум электродных датчиков в морской воде. *Радиотехника и электроника*. 1984, т. 29, №3, с. 484 – 490.
8. Л. А. Потапова, А. М. Рязанцев. Применение метода максимальной энтропии для оценки спектров процессов в диапазоне частот 10^{-3} - 30 Гц. Препринт №298. ИРЭ АН СССР, Москва. 1980 с. 25.
9. О. С. Гашевская, А.С. Гугин, В. А. Дякин В. В. Карнишин, В. Г. Максименко, А. М. Рязанцев. Исследование электромагнитных полей вблизи металлических тел в проводящей среде методом физического моделирования. *Радиотехника и электроника*. 1980, т. 25, №8, с. 1756 – 1758.
10. Взаимодействие электромагнитных полей контролируемых источников СНЧ диапазона с ионосферой и земной корой. Главный редактор академик РАН Е. П. Велихов, г. Апатиты, 2014, с. 1-204 . (Далее в списке литературы: «Сборник 2014»).
11. А. А. Жамалетдинов. Краткие воспоминания участника работ с СНЧ источником «Зевс» по двойному назначению в 1998 - 2013гг. (Сборник 2014. с. 190-195).
12. Trond Jacobsen. The Russian 82 Hz ELF transmitter Zevs. An Extreme Low Frequency transmission system using the real longwaves. ALFLAB Holden in Norway, URL: <http://www.vlf.it/zevs.htm> («Сборник 2014» с. 179-185).
13. A. C. Frazer-Smith. P. R. Bannister. Reception of ELF signals at antipodal distances. *Radio Science* 1998. Т. 33. №1. с.83 («Сборник 2014» с. 144-148).

Ссылка на статью:

А. М. Рязанцев. Экспериментальные исследования распространения электромагнитных волн сверхнизких частот в земной коре и волноводе «Земля-ионосфера», выполненных Институтом радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec17/13/text.pdf>