



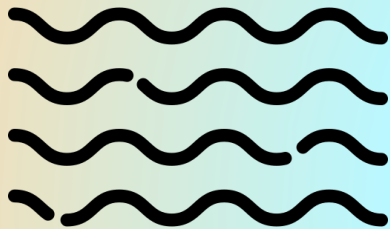
"МИС-РТ"-2025 Сборник № 87-2 <http://ikar.udm.ru/mis-rt.htm>



ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МОРСКОЙ ПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЕ

Лукин Александр Федорович, к. ф. – м. н.
г. Владивосток

РАДИОКАНАЛ В МОРСКОЙ ПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЕ



Проблемы создания наземных беспроводных каналов радиосвязи успешно решены более ста лет назад, однако этого нельзя сказать о подводных радиоканалах в морской среде. Для связи с мобильными подводными объектами применяется гидроакустическая связь, которая обладает существенными недостатками. Оптическая беспроводная связь обеспечивает высокие скорости передачи данных, но на дистанциях, ограниченных прозрачностью воды.

Существующая теория

- Высокочастотная несущая быстро затухает с расстоянием в проводящей морской среде
- Ослабление радиоволны с несущей частотой 27 МГц достигает 195 дБ/метр, или 5 600 000 000 раз по амплитуде, для электропроводности воды 4.77 Сим/м (г.Владивосток, остров Русский, бухта Новик)

Традиционная модель отношения специалистов к распространению высокочастотных электромагнитных волн в морской воде:

а) не распространяются; б) очень быстро затухают;

$$\operatorname{rot}(H) = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$

Уравнение Максвелла, J – ток проводимости

$$J = \sigma * E$$

σ - удельная электропроводность воды Si/m

$$D = \varepsilon * \varepsilon_0 * E$$

Электрическая индукция D

$$\operatorname{rot}(H) = \sigma * E + \varepsilon * \varepsilon_0 * \frac{\partial E}{\partial t}$$

Условия применимости модели:

σ, ε – константы

Метод комплексных амплитуд

$$E = \operatorname{Re} [Ek * \exp(j * \omega * t)]$$

$$H = \operatorname{Re} [Hk * \exp(j * \omega * t)]$$

$$\operatorname{rot}(Hk) = j * \omega * \left\{ \varepsilon * \varepsilon_0 - j * \frac{\sigma}{\omega} \right\} * Ek$$

Уравнение для комплексных амплитуд

$$\varepsilon^* = \varepsilon * \varepsilon_0 - j * \frac{\sigma}{\omega}$$

Комплексная диэлектрическая проницаемость для проводящей морской воды.

$$V_p = 2 * \sqrt{\frac{\pi * f}{\mu * \mu_0 * \sigma}}$$

Скорость распространения

$$\lambda = 2 * \sqrt{\frac{\pi}{f * \mu * \mu_0 * \sigma}}$$

Длина волны

Формулы приближенные, т.к. не включают зависимость от диэлектрических параметров среды.

Расчет поглощения мощности волны в проводящей среде

$$\alpha = \omega * \sqrt{0.5 * \epsilon * \epsilon_0 * \mu * \mu_0 * \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon * \epsilon_0 * \omega} \right)^2} - 1 \right]}$$

$$L(dB/m) = 8,686 * \alpha$$

Оценка потерь мощности волны за счет поглощения в морской воде, на один метр распространения

$$\alpha = \sqrt{\pi * f * \mu * \mu_0 * \sigma}$$

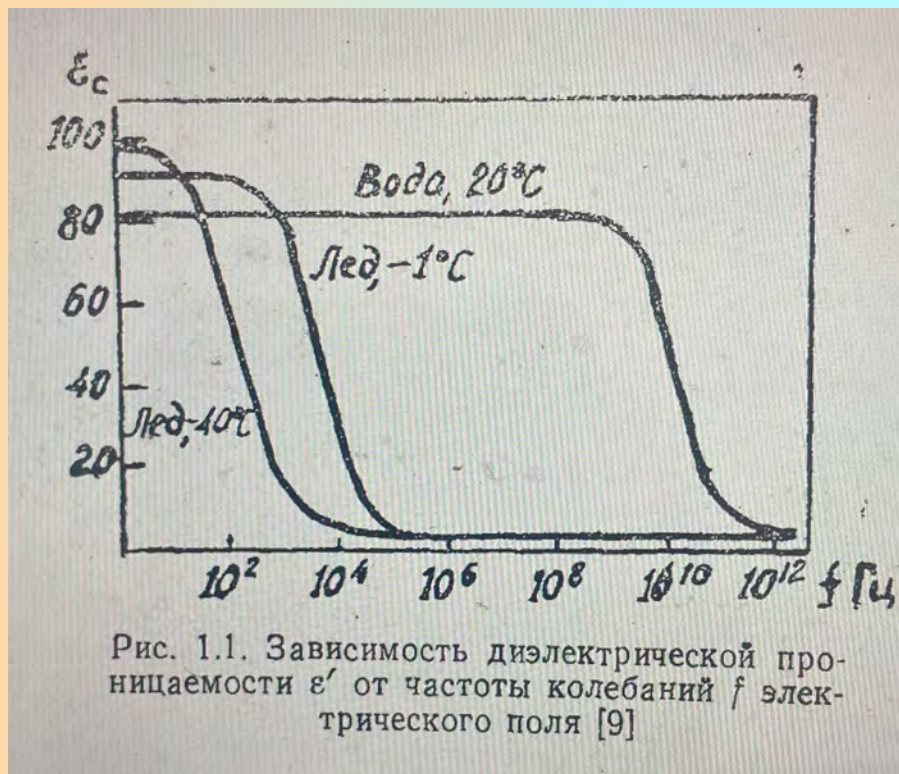
Упрощенная формула для коэффициента поглощения, для частот, намного ниже 882 МГц

f (MHz)	1	2	5	10	20	50	100
Alfa	4,31	6,09	9,63	13,62	19,26	30,46	43,08
L(dB/m)	37	53	84	118	167	265	374

Оценки потерь мощности волны за счет поглощения в морской воде для разных частот

Wang, J. and Wang, S. College of Electronic Science and Technology, **National University of Defense Technology**, (2019) Seawater Short-Range Electromagnetic Wave Communication Method Based on OFDM Subcarrier Allocation. *Journal of Computer and Communications*, **7**, 63-71. doi: [10.4236/jcc.2019.710006](https://doi.org/10.4236/jcc.2019.710006).

Диэлектрическая проницаемость морской воды

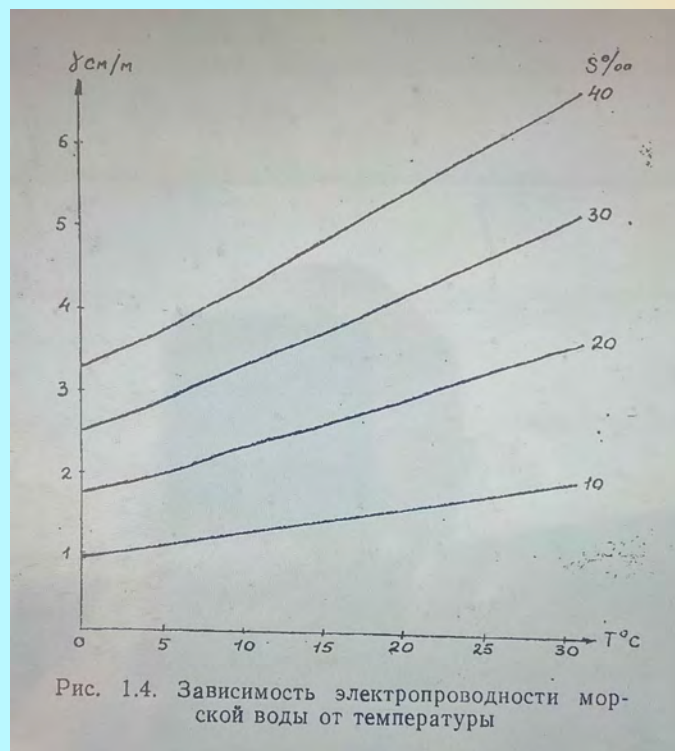
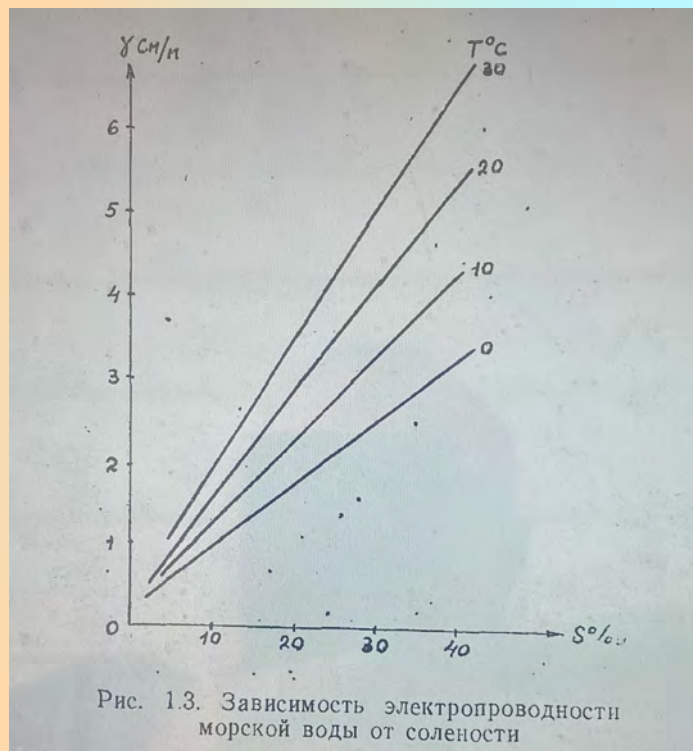


Частота МГц	Температура в градусах Цельсия			
	1,5	5,0	25,0	45,0
1	87,0	85,5	78,2	71,5
300	86,5	85,2	77,5	71,0
3000	80,5	80,2	76,7	70,7
10000	38,0	41,0	55,0	59,0
25000	15,0	17,5	34,0	46,0

С ростом частоты внешнего поля, молекулы воды не успевают изменять ориентацию. Имеет место и сдвиг по фазе между приложенным полем и ориентацией молекул. Процесс описывается дисперсионными соотношениями Дебая. Характерное время диэлектрической релаксации $10^{(-11)}$ секунды.

Из книги Ю.П.Доронин, И.А.Степанюк, «Электромагнитное поле океана», РГГМИ, 1992 г.

Электропроводность морской воды



Электропроводность морской воды зависит от солености, температуры и давления
(Из книги Ю.П.Доронин, И.А.Степанюк, «Электромагнитное поле океана», РГГМИ, 1992 г.)

От чего зависит электропроводность морской воды?

- Вклад в % различных ионов в электропроводность при $T=23$ градуса, солёности 35 промилле: Cl (-) 64%; Na(+) 29%; Mg(++) 2,7%; SO₄(--) 2,3%; K(+) 1,1%.
- Зависит от перечисленных выше ионов, от протонов H⁺ и гидроксила OH⁻.
- Концентрация ионов увеличивается с ростом солёности.
- Подвижность ионов разная. Например у H⁺ и у OH⁻ она отличается в 2 раза.
- Подвижность ионов растёт с ростом температуры. Увеличиваются собственные скорости ионов, уменьшается вязкость и растёт степень диссоциации молекул.
- Электропроводность увеличивается с ростом давления. Уменьшается вязкость, возрастает концентрация ионов и уменьшаются размеры отдельных ионов.
- Удельная электропроводность морской воды составляет 3 – 7 S/m. Для дистиллированной воды 0,0002 S/m. В морской акватории г.Владивостока электропроводность около 4,7 S/m.

Считать, что электропроводность морской воды – константа – недопустимое для физической модели электромагнитных волн в морской воде упрощение.

Электропроводность морской воды

«Как это ни поразительно, но механизм электропроводности не известен.

Это является следствием двух причин, одна из которых достаточно веская и объективная, а другая нет. Первая состоит в том, что исследуемая система, как мы давно могли убедиться, обладает чрезвычайной сложностью. Вторая причина довольно любопытна. Существующая, недостаточно совершенная модель процесса электропроводности работает настолько хорошо что до некоторой степени устраняет необходимость в появлении модели, которая бы более точно отражала истинное положение вещей.»

Цитата из монографии: Р. Хорн, «Морская химия». М., «Мир», 1972, стр. 86.

Краткий обзор некоторых важных публикаций

- **'Underwater radio communication', Wireless World, 73, p. 80, February 1966.**

<https://worldradiohistory.com/UK/Wireless-World/60s/Wireless-World-1966-02.pdf>

На частоте 500 МГц были успешно переданы под водой электромагнитные сигналы, согласно докладу компании "Northrup Corporation of Washington". Эксперимент был выполнен дочерней компанией «Page Communications Engineers». В первых экспериментах сигналы от 100 Гц до 500 МГц были переданы на расстояние 3,65 м в пластиковом бассейне. Последующие эксперименты в заливе Сан-Франциско показали успешную передачу сигнала с помощью передатчика мощностью 250 Вт на глубине 76 м на расстояние 457 м. Сила сигнала на частоте 7 МГц при длине излучающего диполя 6 м практически не менялась с глубиной, что не допускало объяснение факта передачи поверхностными волнами. С ростом длины диполя сила сигнала также возрастала.

- **Al-Shamma, A.Shaw & S. Saman, Propagation of Electromagnetic Waves at MHz Frequency through Sea water", IEEE Trans. Antennas Propagation, Vol.52, No.11, PP: 2843- 2849, Nov. 2004.**

Выполнены экспериментальные измерения затухания электромагнитных волн на мегагерцовых частотах. Показано, для электрических и магнитных антенн, как в экспериментальном бассейне, так и в морских условиях (в доке Ливерпуля, Великобритания) зависимость затухания от расстояния. На частоте 1 МГц при удельной электропроводности воды 4S/m основное затухание амплитуды наблюдалось в ближней зоне антенн на расстояниях 1 – 1,5 м. С дальнейшим ростом расстояния до 90 м затухание изменялось очень слабо с расстоянием. Аналогичное явление наблюдалось при распространении электромагнитных волн в глубину. От 0,6 до 1,3 м амплитуда сигнала уменьшалась от 0,04 mV до 0,003 mV, а далее, с ростом глубины до 6 м находилась в пределах 0,003 – 0,004 mV. Также было показано преимущество в чувствительности магнитной рамки перед электрическим диполем.

- **J. H. Goh, A. Shaw, A. I. Al-Shamma'a, "Underwater Wireless Communication System", Journal of Physics: Conference Series 178 (2009) 012029 doi:10.1088/1742-6596/178/1/012029 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/178/1/012029/pdf>**

Рассматривается технология создания системы подводной электромагнитной связи, включая расчет и конструирование рамочных магнитных антенн. В качестве примера рассматривается двухвитковая подводная магнитная антенна, рассчитанная на рабочую частоту 8 МГц. Приведены характеристики уровня принимаемого сигнала для частот в диапазоне 4 – 20 МГц. Указывается, что несмотря на высокое затухание сигнала в ближней зоне антенны, сигнал в дальней зоне антенны существенно выше, чем это считалось ранее. Указаны преимущества использования электромагнитных волн под водой для решения задач связи и передачи данных.

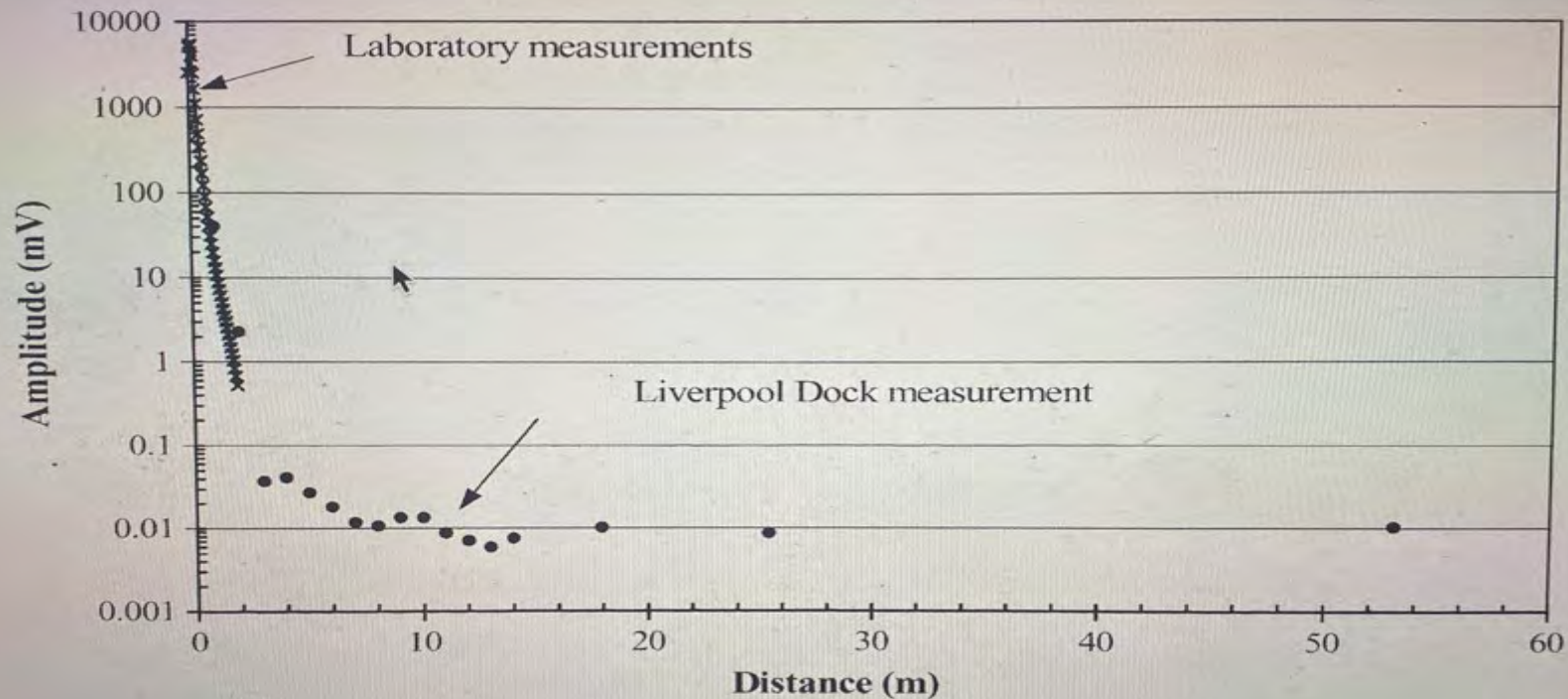


Fig. 13. Signal propagation of 1 MHz and power of 4.75 W in laboratory tank and seawater "Liverpool dock" at a conductivity of 4 S/m.

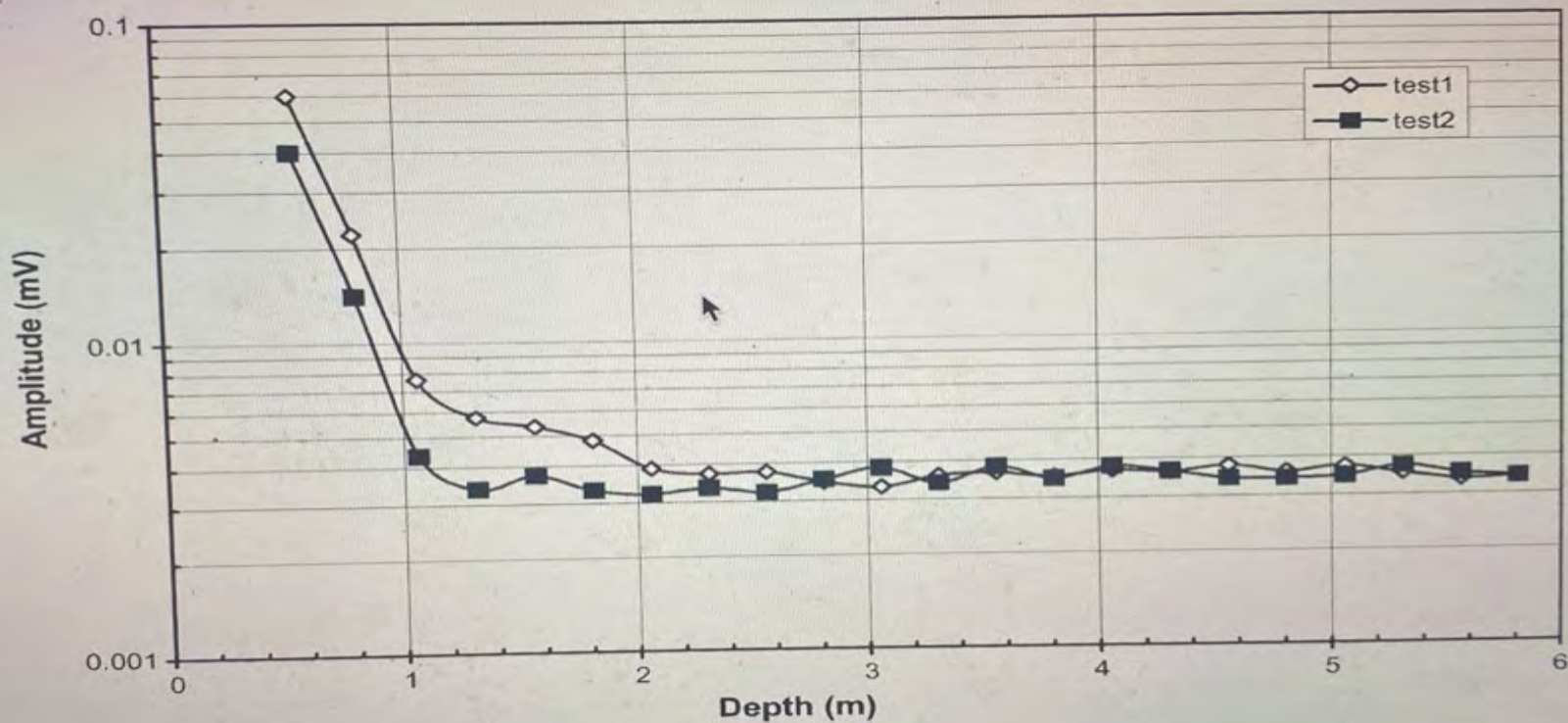


Fig. 14. Measurements in vertical water at seawater conductivity of 4.1 S/m.

Рисунок из статьи A. Shaw, A.I. Al-Shamma'a, S.R. Wylie and D. Toal «Experimental Investigations of Electromagnetic Waves Propagation in Seawater». Proceedings of the 36th European Microwave Conference.

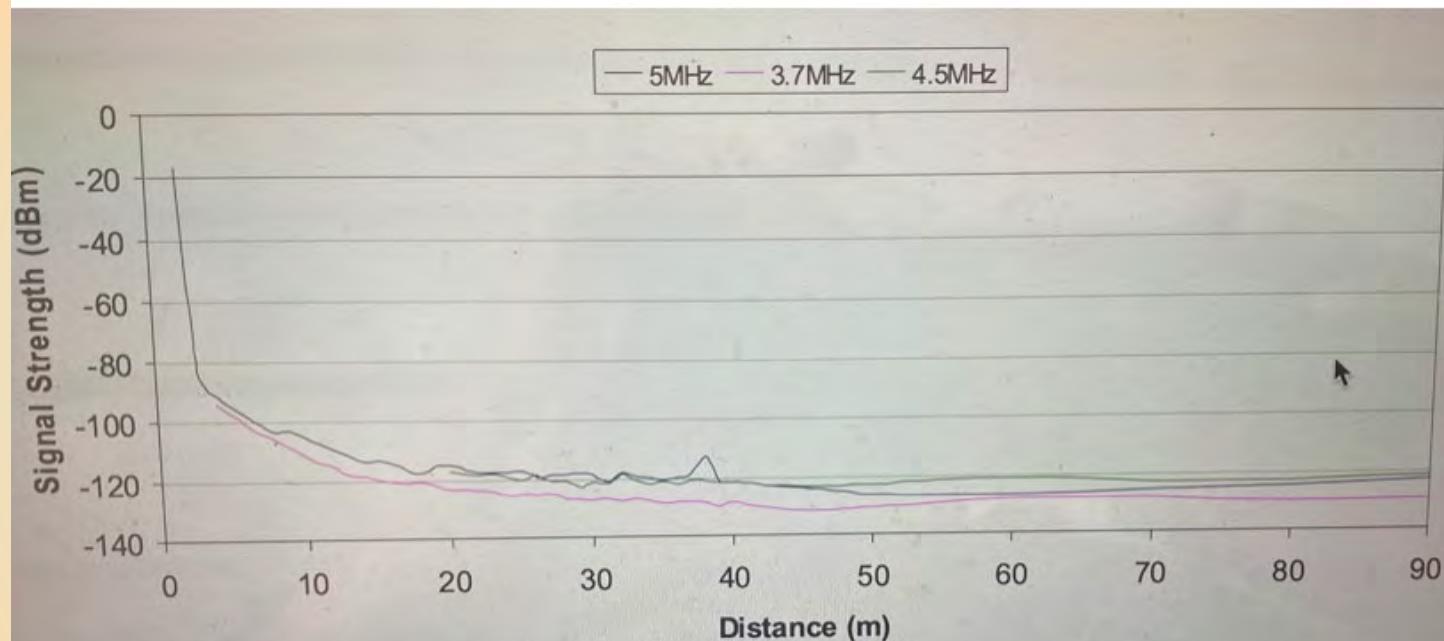


Fig. 7. Signal propagation with an RF power of 5W at the Liverpool marina long range test site.

Эксперименты в акватории г.Владивостока. Описание установки.

Экспериментальная приемо – передающая подводная система связи

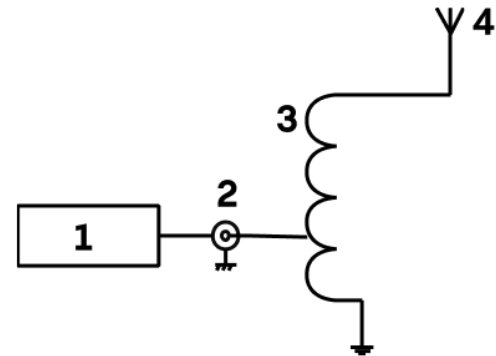


Плоская спиральная катушка

Сфера из проводящего металла (медь, латунь).

Металлический проводящий стержень.

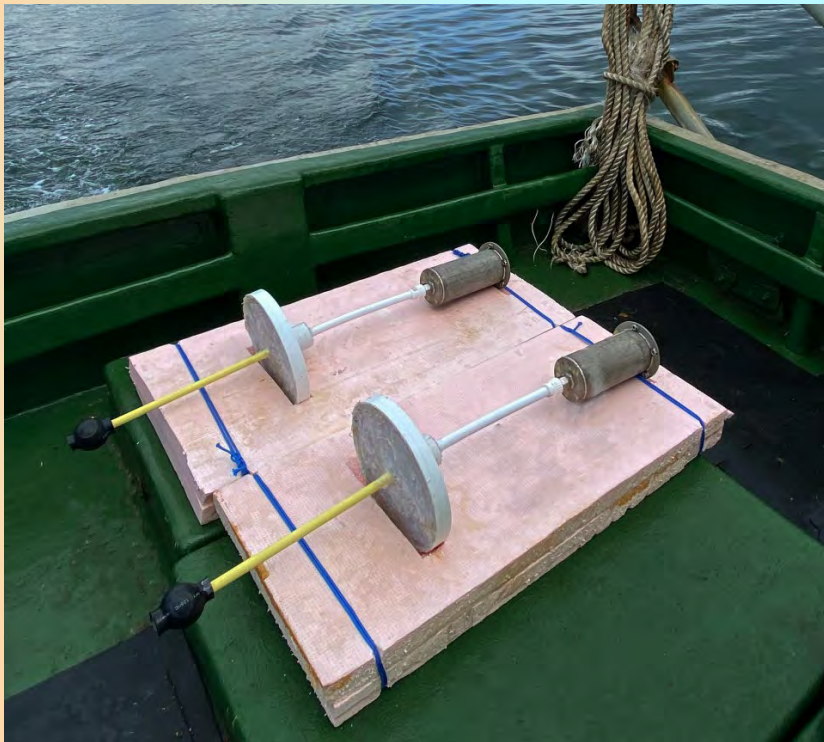
Схема передающей станции



1. Радиостанция в режиме "передача тонального вызова"
2. Коаксиальный соединитель
3. Спиральная катушка
4. Антенна в виде медного шара

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Экспериментальная радио – передающая подводная система связи



В герметичных боксах размещаются радиостанции 27 МГц и диктофоны для генерации сигналов модуляции и для записи принятых сигналов.

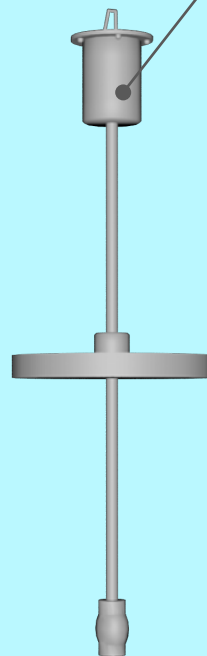
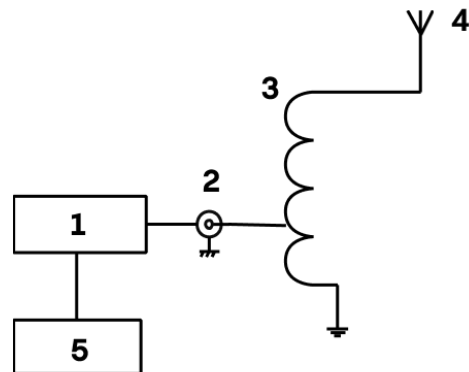


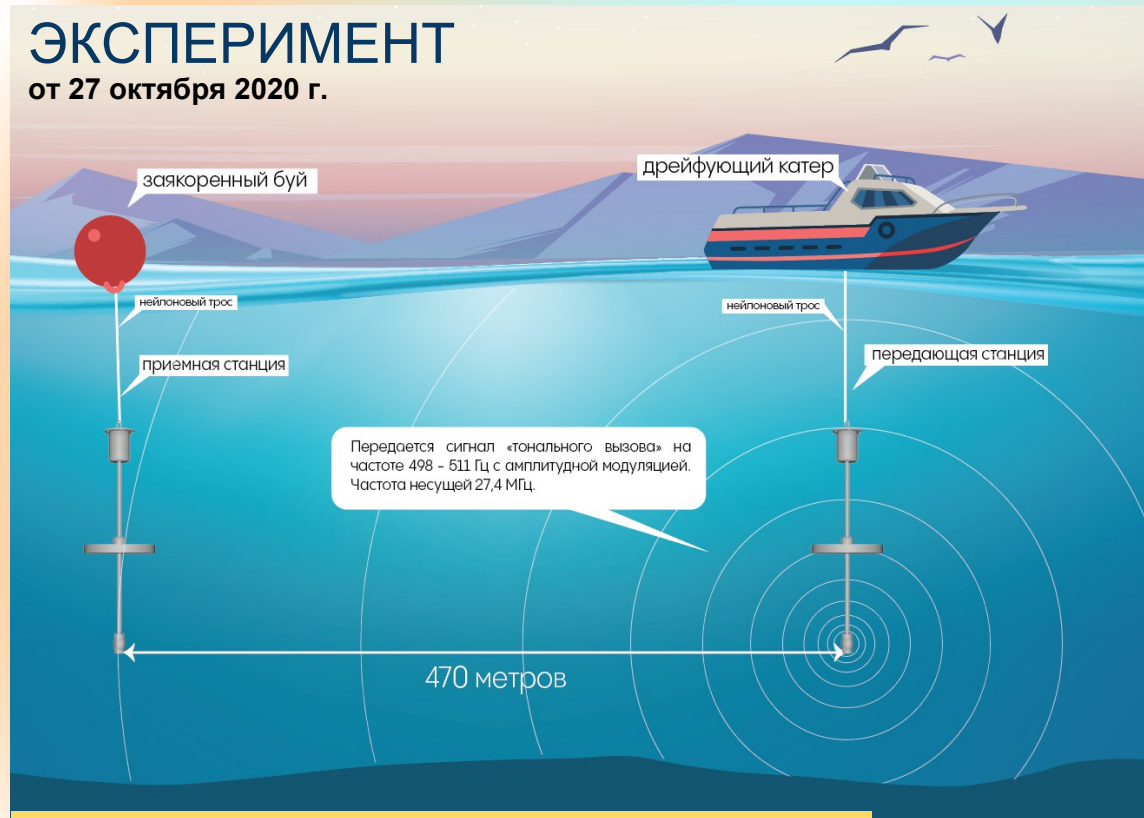
Схема приемной станции



1. Радиостанция в режиме “передача тонального вызова”
2. Коаксиальный соединитель
3. Катушка Теслы
4. Антенна в виде медного шара
5. Цифровой диктофон

ЭКСПЕРИМЕНТ

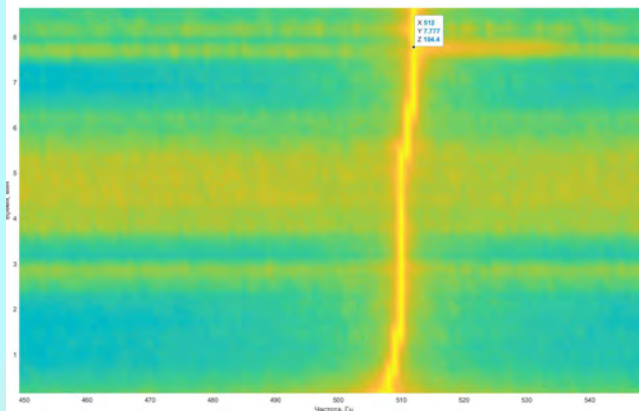
от 27 октября 2020 г.



Информация об эксперименте

- г. Владивосток, остров Русский, бухта Новик
- Глубина моря 16 метров, глубина станций 8 метров
- Приемная станция на заякоренном бье
- Передаточная станция на дрейфующем катере
- Передается сигнал «тонального вызова» на частоте 498 - 511 Гц с амплитудной модуляцией. Частота несущей 27,4 МГц
- Контрольная дальность связи 470 метров
- Радиостанции «Штурман 882М», мощность около 1 Вт

«Сонограмма принятого сигнала в координатах частота – время»



Запись сигнала, прошедшего под водой 470 метров



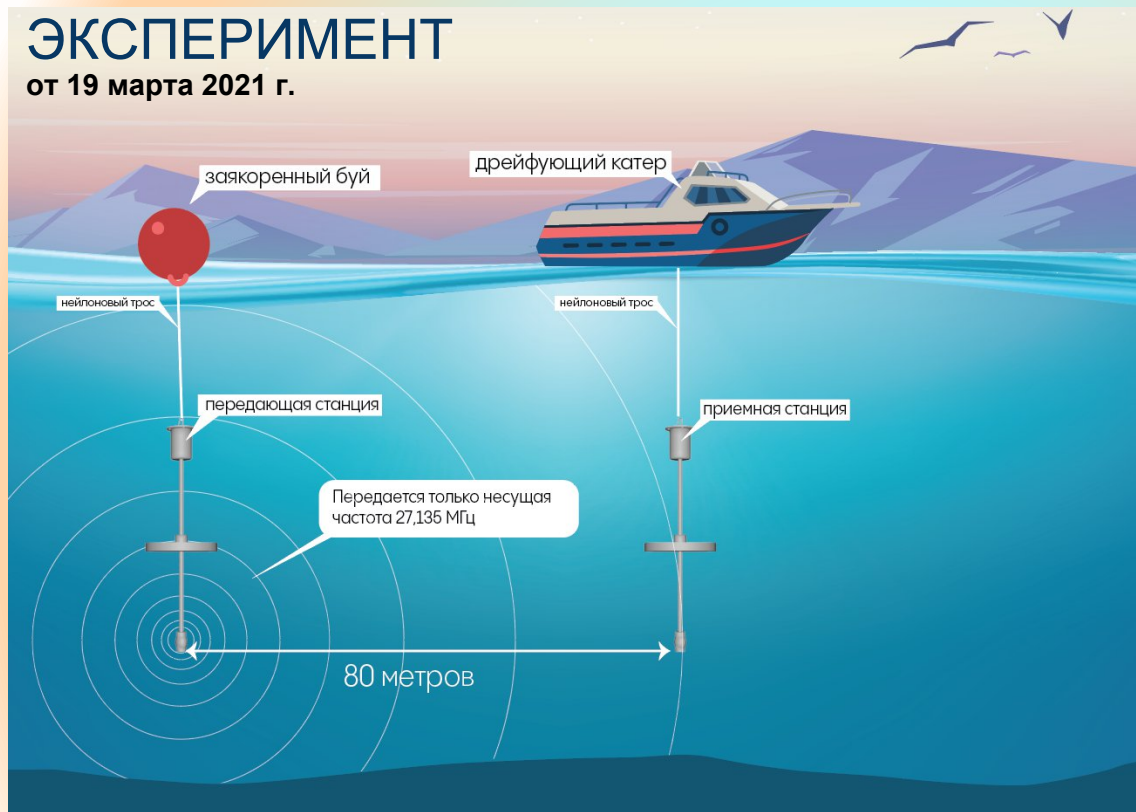
Прослушать



Превышение уровня сигнала над помехой 5 – 8 дБ в полосе 1 Гц

ЭКСПЕРИМЕНТ

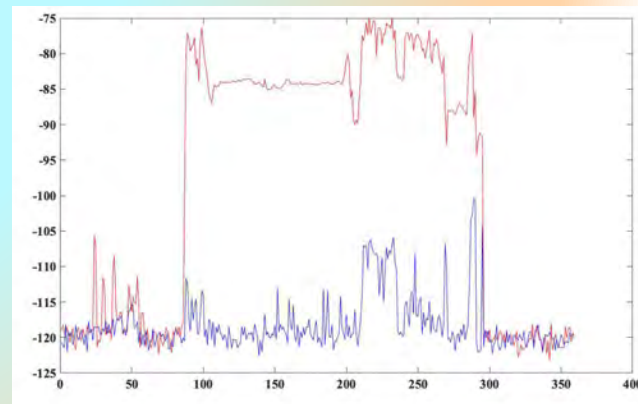
от 19 марта 2021 г.



Информация об эксперименте

- г. Владивосток, район острова Скрыплева.
- Глубина моря 16 метров, глубина станций 8 метров
- Передающая станция на заякоренном бье
- Приемная станция на дрейфующем катере
- Передается только несущая частота 27,135 МГц
- Расстояние от передатчика до приемника 80 метров.
- Используется SDR приемник. Частота гетеродина 27,131 МГц

Сигнал 3960 Гц от 108 до 197 сек с превышением сигнала над помехой на 28,7 дБ. Расстояние от передатчика до приемника 80 метров.



Запись сигнала с несущей частотой 27.135 МГц

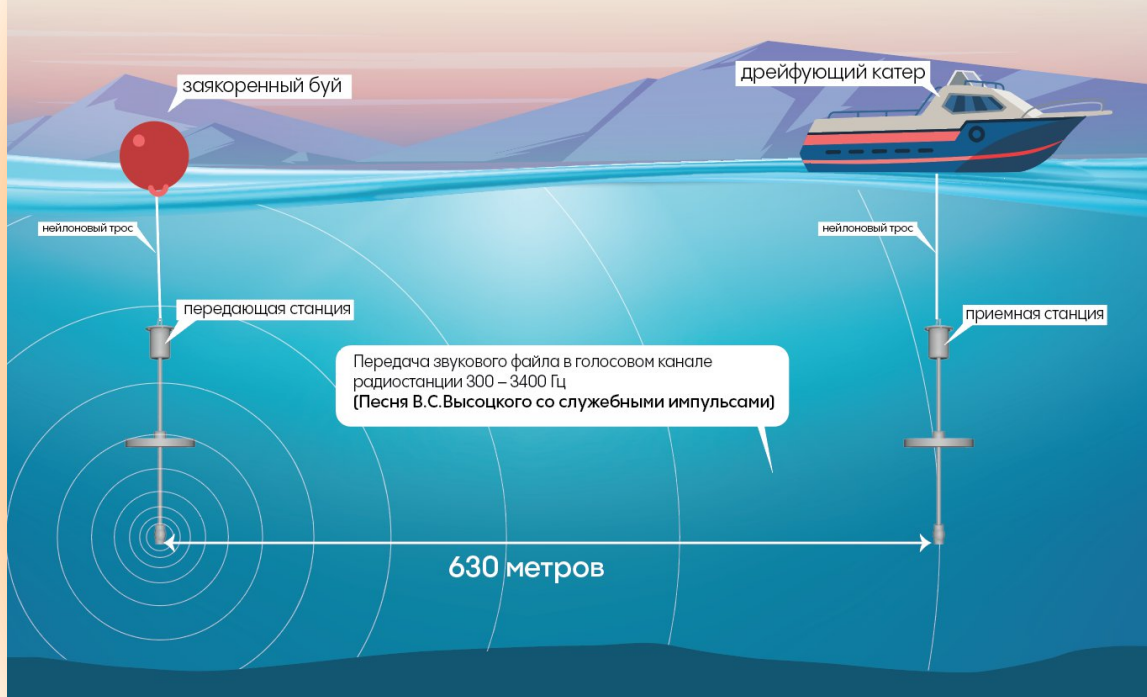


Прослушать



ЭКСПЕРИМЕНТ

от 01 апреля 2022 г.

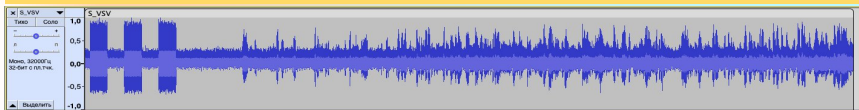


Информация об эксперименте

- г. Владивосток, остров Русский, бухта Новик
- Глубина моря 32 метров, глубина станций 8 метров
- Приемная станция на заякоренном бье
- Передающая станция на дрейфующем катере
- Радиостанция «Алан-42», 27 МГц, мощность около 1 Вт
- Передача звукового файла в голосовом канале радиостанции 300 – 3400 Гц (Песня В. С. Высоцкого со служебными импульсами)
- Дальность передачи сигнала 630 метров



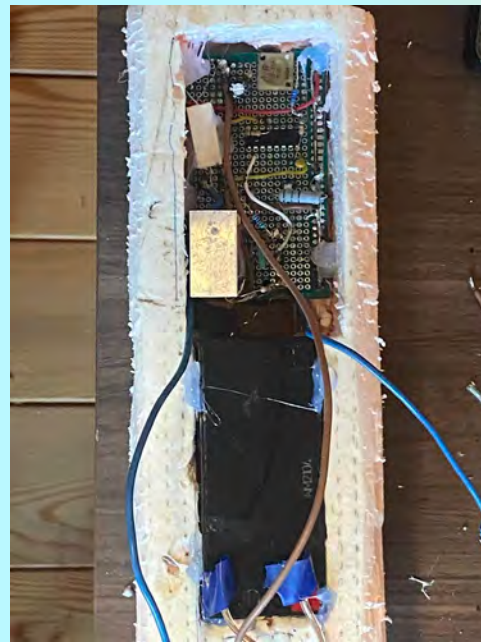
Запись сигнала с переданным аудио файлом



Прослушать

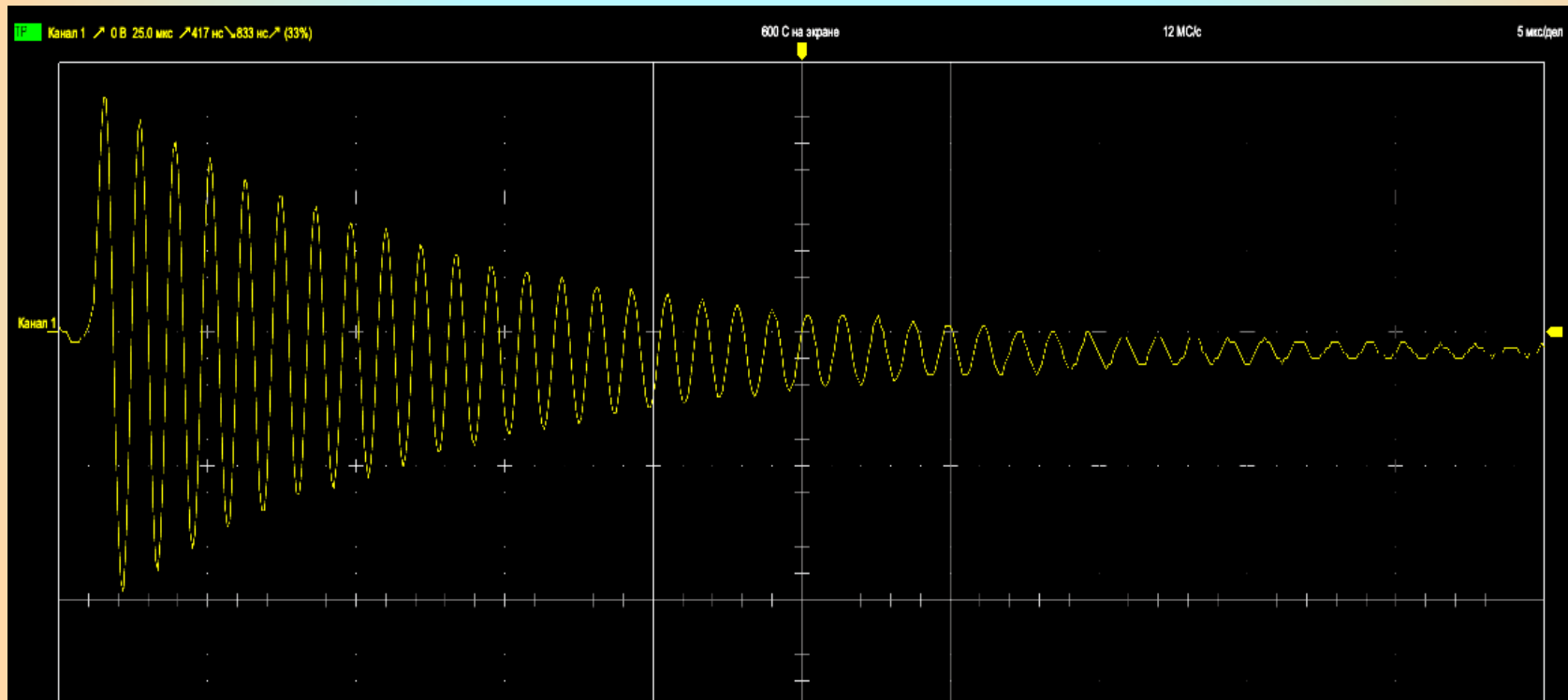


Магнитные антенны и передатчик ударного возбуждения

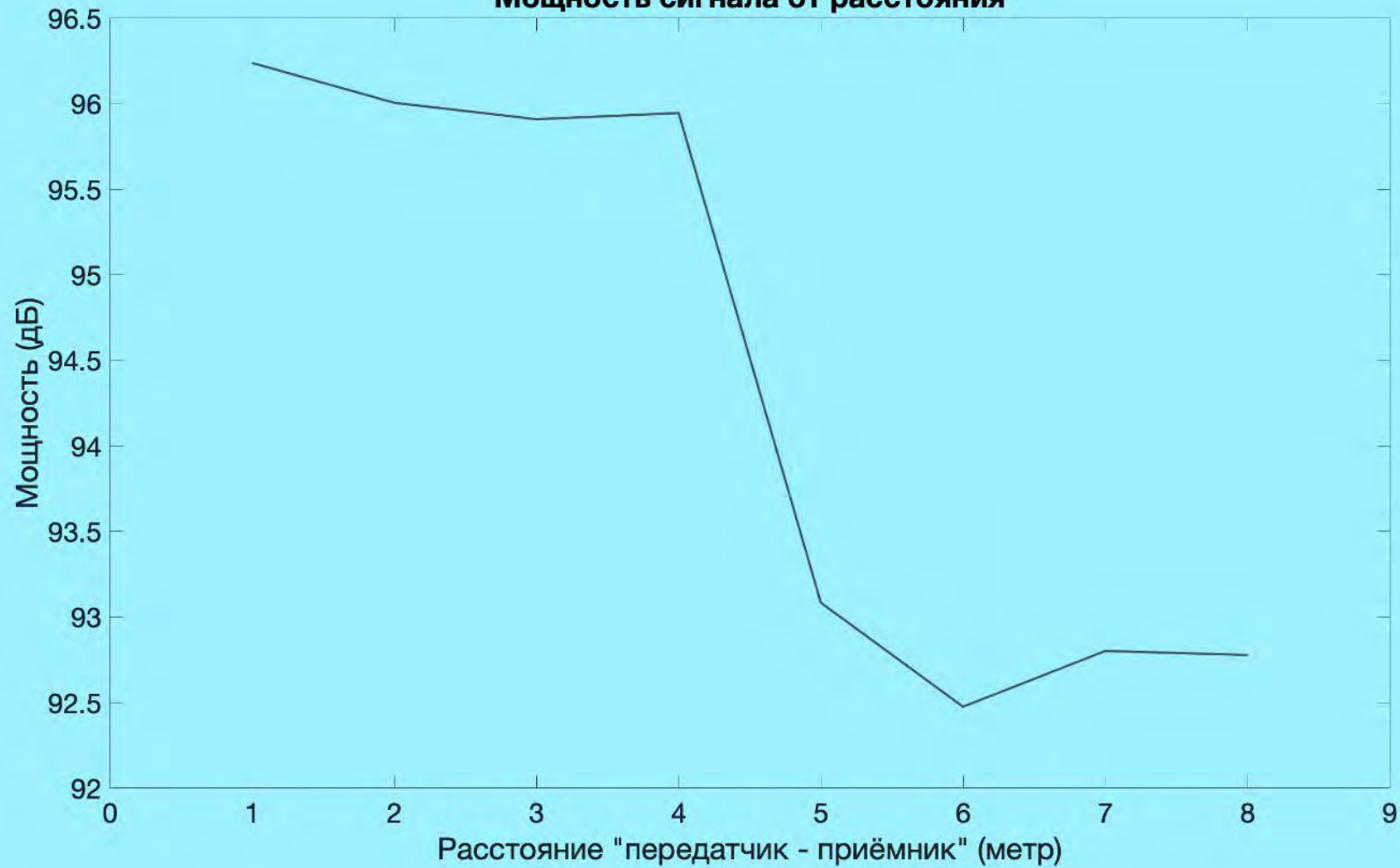


Преимущества: автоматическое согласование антенны со средой

Сигнал передатчика ударного возбуждения (19 июля 2024г.)



Мощность сигнала от расстояния



Эксперименты с магнитными антеннами на льду 24 февраля 2025 г.



Задача: оценка длины волны на частоте 2,048 МГц под водой с помощью интерференции.

НЕКОТОРЫЕ ВЫВОДЫ

- Физические модели распространения электромагнитных волн в морской среде неоправданно упрощены и не учитывают свойства среды, хорошо изученные океанологией.
- Высокочастотные электромагнитные явления способны обеспечить создание новых технологий исследования и освоения Мирового океана.
- В мире уже существуют компании, которые занимаются строительством морских подводных сетей для скоростной передачи данных. Когда-нибудь это будет востребовано и в России.

Отчет об исследовании рынка подводной радиосвязи 2024–2031. 122 страницы. Мира Рават

<https://medium.com/@meeraravat/underwater-radio-communication-market-analysis-research-report-2024-2031-122-pages-2ae1850fc6>

Компании, представленные в Отчете

Mistral

Hydroacoustic

Thales Group

Furgo

SONARDYNE

Tritech International

Subnero Pte. Ltd.

Kongsberg Gruppen

Nortek

Saab AB

DSPComm

Baltrobotics

Gavial Holdings

Teledyne Technologies Incorporated

Ultra Electronics

EvoLogics GmbH

Aquatec Group

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ В МОРСКОЙ ВОДЕ



В отличие от гидроакустики,
высокая частота несущей
допускает передачу
широкополосных сигналов



Связь с подводными
объектами, в том числе в
движении



Точная навигация
подводных объектов по
радиомаякам



Создание подводного
Интернета и сети GPS



Подводная радиолокация,
как альтернатива
гидролокации

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ



Необходимо проведение фундаментальных экспериментов, связанных с распространением электромагнитных волн в морской среде, в том числе:

- Измерение скорости распространения волн
- Исследование перехода волн через границы раздела сред: вода – воздух, вода – грунт
- Определение степени затухания волн с расстоянием
- Оценки влияния на распространение волн границ волноводов, образованных водными слоями, а также ледяным покровом в Арктике
- Исследование распространения волн в глубоком море (5 км и более)
- Конструирование антенн, включая антенные решетки
- Исследование возможностей подводной радиолокации, зондирования морского дна и разведки полезных ископаемых

ПУБЛИКАЦИИ



А.К. Томилин, А.Ф. Лукин, А.Н. Гульков. «Эксперимент по созданию канала радиосвязи в морской среде». ПЖТФ, 47(11), 2021. DOI: [10.21883/PJTF.2021.11.51009.18710](https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.11.51009.18710) [А.К. Tomilin, A. F. Lukin, A. N. Gulkov. Technical Physics Letters, 47(6), 2021. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063785021060146>]

А.Ф. Лукин, А.К. Томилин, А.Н. Гульков, К.А. Кремс. «Оценка характеристик канала радиосвязи в морской среде». ЖТФ, 92(9), 2022. DOI:10.21883/JTF.2022.09.52935.43-22 <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/52935>

А.Ф.Лукин, «Высокочастотные электромагнитные волны в морской среде. Краткий обзор». Журнал «Метафизика», март 2025, в печати.

Основные мысли, которые хотелось бы отметить:

1. Необходимо разрушить стереотип среди физиков, которые считают, что в морской воде высокочастотные электромагнитные волны очень быстро затухают.
2. Специалистам в электродинамике нужно осознать, что Мировой океан – очень сложная среда и параметры переменных в уравнениях Максвелла должны зависеть от координат и времени.
3. Феномен сильного затухания электромагнитных волн в ближней зоне передатчика и малого затухания в дальней зоне – это новое явление, которое может стать основой подводного электромагнитного канала дальнего распространения радиоволн, подобного известному подводному звуковому каналу.
4. В мире в разных странах ведутся работы по созданию подводных сетей передачи данных различного назначения. Концепция строится на топологии базовых станций, мобильной связи. В качестве магистральных каналов между базовыми станциями используются скоростные электромагнитные каналы подводной связи, в том числе и с мобильными объектами.
5. Россия сегодня имеет собственный потенциал, но будет вынуждена догонять лидеров. Особенно это очевидно для задач применения автономных подводных аппаратов в оборонном комплексе

КОНТАКТЫ

Лукин Александр Федорович

к. ф. — м. н.

Ех. Заведующий Лабораторией инновационных технологий,
Департамента нефтегазовых технологий и нефтехимии,
Дальневосточного федерального университета, г. Владивосток

E-mail: a.lukin@list.ru

Моб.: **+7 924 246 6012** (WhatsApp). От Москвы +7 часов.