

DOI: 10.22363/2224-7580-2025-1-157-166

EDN: YVELHI

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В МОРСКОЙ СРЕДЕ: КРАТКИЙ ОБЗОР

А.Ф. Лукин

*Индивидуальный исследователь
Российская Федерация, Приморский край*

Аннотация. Представлены результаты наиболее значимых теоретических и экспериментальных работ в области использования электромагнитных высокочастотных волн в морской среде, опубликованных в XX и начале XXI века. Кратко описаны основные характеристики распространения волн, наблюдаемые эффекты, а также рекомендации по разработке и конструированию эффективных подводных антенн.

Ключевые слова: электромагнитные волны, морская среда, подводные антенны, затухание радиоволн, высокочастотные радиоволны

Введение

Современная прикладная электродинамика недостаточное внимание уделяет вопросам излучения, распространения и приема высокочастотных электромагнитных сигналов в водной среде. В особенности это характерно для морской среды, имеющей высокую удельную электропроводность. Во многих монографиях и научных статьях, на основании уравнений Максвелла и закона Ома, с использованием метода комплексных амплитуд вводится понятие комплексной диэлектрической проницаемости для проводящей среды. В результате получают оценки для глубины проникновения высокочастотных электромагнитных волн в проводящую среду, например в морскую воду. Глубиной проникновения считается расстояние, на котором амплитуда электромагнитной волны уменьшается за счет поглощения в среде в $e = 2,71828$ раза. В результате, например, для частот в 1 МГц и выше расстояние, на котором может быть обеспечен энергетический бюджет потенциальной радиолинии, оценивается единицами метров. В результате в физике и радиотехнике среди специалистов, сформировалось устойчивое мнение о нецелесообразности практического применения электромагнитных волн в проводящих водных средах.

Однако в последние десятилетия множество публикаций посвящено созданию подводных сетей связи и передачи данных, в которых именно электромагнитные каналы связи имеют преимущества перед гидроакустическими и оптическими каналами. Прежде всего, это связано с тем, что электромагнитные высокочастотные каналы связи могут обеспечить более высокие

скорости передачи данных, чем гидроакустические каналы. В то же время электромагнитные каналы в меньшей степени зависят от прозрачности или мутности воды, чем оптические каналы.

Но самое главное, что проведенные в разных странах разными группами исследователей прямые эксперименты по распространению высокочастотных электромагнитных волн в проводящих водных средах, в частности в морской среде, доказали, что теоретические расчеты по поглощению таких волн оказались значительно завышены.

Задача настоящей статьи – показать развитие подводной высокочастотной радиосвязи по материалам публикаций в открытой печати и привлечь внимание исследователей и разработчиков прикладных систем к тематике этих работ.

1. Публикации в XX веке

В настоящей работе не предполагается рассматривать системы электромагнитной связи в диапазонах сверхдлинных волн (СДВ), например [1; 2]. На эту тему в доступной литературе существует множество публикаций.

Первые публикации в области подводной электромагнитной связи в море относятся к 1919–1920 годам. В 1919 году П. Лоуэлл (P.D. Lowell) [3] описал петлевые магнитные антенны, которые использовались для связи между подводными лодками и были встроены в их корпуса как часть антенной системы.

В 1919 году А. Тейлор (A. Taylor) [4] проводил эксперименты с длинной (до 153 м) проводной антенной на подводной лодке в штате Вашингтон.

В 1920 году Р. Бэтчер (R.R. Batcher) [5] использовал петлевые магнитные антенны, встроенные в корпуса подводных лодок. Были проведены эксперименты по передаче электромагнитных сигналов под водой между лодками на полной скорости хода, на расстоянии до 20 км с помощью магнитных антенн.

В 1951 году Р. Мур (R.K. Moore) [6] впервые разработал теорию погруженных в морскую воду электромагнитных петлевых антенн. В частности, для связи подводных лодок испытывались горизонтальные и вертикальные дипольные антенны, погруженные в море.

В 1969 году по программе SEDAR [7] успешно испытывалась система дистанционного подводного электромагнитного размыкателя для подъема оборудования, установленного на дне моря. Система состоит из буксируемой на поверхности антенной решетки, а также приемника и механизма размыкания заякоренных устройств на глубинах до 200 м. Система работала на дальностях до 1000 м при выходной мощности передатчика 1000 Вт.

В 1959 году Р. Тернер (R.W. Turner) [8] подробно описал систему электромагнитной связи между подводными лодками во времена Второй мировой войны. Приведены варианты конструкций высокочастотных антенн. Указаны измеренные оценки затухания электромагнитных волн в морской воде с удельной электропроводностью 4 См/м. Например, для 1 МГц затухание составило около 10 dB/foot (32,8 дБ/м).

В 1966 году компанией «Northrup Corporation of Washington» [9] опубликованы итоги экспериментов по распространению электромагнитных волн в морской среде. На частоте 500 МГц электромагнитные волны успешно передавались на коротких расстояниях. В экспериментах дочерней компании Page Communications Engineers были использованы сигналы с частотами от 100 Гц до 500 МГц, которые передавались на расстояние 12 футов (3,65 м) в пластиковом бассейне. Последующие эксперименты в заливе Сан-Франциско показали успешную передачу сигнала с помощью передатчика мощностью 250 Вт на глубине 250 футов (76 м) на расстояние 1500 футов (457 м). Сила сигнала на частоте 7 МГц при длине излучающего диполя 20 футов (6 м) практически не менялась с глубиной, что не допускало объяснение факта передачи поверхностными волнами. С ростом длины диполя сила сигнала также возрастала. Последнее замечание вызывает вопросы, так как ставит под сомнение резонансные характеристики дипольных антенн в проводящей среде.

В 1973 году М. Сигел (M. Siegel) и Р. Кинг (R.W.P. King) [10] привели результаты исследования коротких диполей, погруженных на 0,15 м в океан на частотах 100 кГц и 14 МГц. Были измерены напряженности электрического поля, распределения токов по антеннам, а также импеданса. Приведены сравнения полученных данных с теорией.

В 1972 году И. Боги (I.S. Vogie) [11] опубликовал данные о зависимости скорости электромагнитных волн, глубины проникновения, длины волны от частоты для морской воды. Приведены примеры использования электромагнитных волн под водой для связи между дайверами на глубинах 30 м, для расстояний в 100 м при мощности передатчиков 10 Вт. Береговая станция покрывала зону в 5 км² при дальности 355 м и мощности передатчика 160 Вт.

В 1987 году Л. Батлер (L. Butler) [12] исследовал эффекты распространения электромагнитных волн на частоте 1,8 МГц. Сделан вывод, что из-за высокого затухания сигнала в морской воде решения по организации каналов связи возможны в области частот 10–30 кГц. Работа на частоте 1,8 МГц ограничена высоким уровнем затухания в 46 дБ/м.

В 1977 году U.S. Naval Underwater Ordnance Station, Newport, Rhode Island опубликовало материал «Electromagnetic radiation in sea water» [13]. В нем детально изложены, в зависимости от частоты, такие характеристики, как присущий морской воде импеданс, скорость распространения волн, степень затухания. Приводятся коэффициенты передачи волн через границу раздела «вода – воздух» в зависимости от углов падения для волн с вертикальной и горизонтальной поляризацией.

2. Публикации в XXI веке

В 2004 году Аль-Шамма (Al-Shamma) [14] вместе с другими учеными из Университета г. Ливерпуль (Великобритания), провели фундаментальные измерения затухания электромагнитных волн на мегагерцовых частотах в морской воде. Для электрических и магнитных антенн, в экспериментальном

бассейне и в морских условиях (в одном из доков Ливерпуля) измерены зависимости затухания волн от расстояния. На частоте 1 МГц при удельной электропроводности воды 4 См/м 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 с увеличением глубины. От 0,6 до 1,3 м амплитуда сигнала уменьшалась от 0,04 мВ до 0,003 мВ, а далее – до 6 м находилась в пределах 0,003–0,004 мВ. Также было показано преимущество чувствительности магнитной рамки перед электрическим диполем.

В 2008 году А. Гудевенок (Apostolous Goudevenoc) [15] обобщил результаты исследований, выполненных Университете Ливерпуля. Для пресной и для морской воды приведены таблицы по ослаблению сигнала для частот от 0,5 до 60 МГц, как с учетом его дифракции, так и поглощения в среде. Даны рекомендации по конструированию подводных антенн.

В 2009 году Дж. Гох (J.H. Goh) и др. [16] разработали технологию создания системы подводной электромагнитной связи, включая расчет и конструирование рамочных магнитных антенн. Приведен расчет подводной магнитной антенны из двух витков для рабочей частоты 8 МГц. Исследованы характеристики уровня принимаемого сигнала для частот в диапазоне 4–20 МГц. Сделан вывод о том, что, несмотря на высокое затухание сигнала в ближней зоне антенны, сигнал в дальней зоне существенно выше, чем это считалось ранее. Описаны преимущества использования электромагнитных волн под водой для решения задач связи, передачи данных, передачи компрессированного видео и радиолокации.

В 2014 году Н. Джордж (Nisha George) с соавт. [17] опубликовали практический обзор по конструированию и применению подводных электромагнитных антенн для использования в океане. Исследовано пиковое усиление, возвратные потери, диаграммы направленности. Отмечена высокая востребованность антенн, работающих в полосе частот более 500 МГц на короткие расстояния.

В 2013 году Г. Хаттаб (Ghaith Hattab) и др. [18] рассмотрели модель подводных коммуникаций для создания сетей передачи данных. Выполнены оценки потери сигнала в зависимости от параметров морской среды. Приведены температурные зависимости диэлектрической проницаемости и удельной электропроводности воды, коэффициенты отражения электромагнитных волн от границ раздела сред. Изложены теоретические результаты и результаты моделирования.

В 2019 году О. Абадерин (Oluyomi Abaderin) [19] детально рассмотрел вопросы теории и практики расчетов и конструирования подводных электромагнитных антенн. Опубликованы расчеты характеристик многих конкретных антенн при работе в морских условиях.

В 2007 году Дж. Лукас (J. Lucas) и К. Йип (C.K. Yip) и др. [20] привели результаты натуральных экспериментов в морской воде и лабораторных экспериментов в волноводе. Отмечен высокий уровень потерь сигнала в ближней

зоне передающей антенны. Впервые предложена модель распространения электромагнитных волн в проводящей морской среде, которая базируется на эффектах вторичного электромагнитного излучения возбужденными молекулами воды.

Детальные экспериментальные измерения были выполнены в рамках Европейского проекта EMCOMM. В 2008 году К. Йип и др. [21] провели эксперименты по распространению электромагнитных волн в диапазоне частот 1–20 МГц в морской воде с удельной электропроводностью воды 4 См/м. При мощности передатчика 30 Вт дальность приема сигнала составила 100 м. В области частот 3,7–5,0 МГц уровень сигнала быстро снижался в области дистанций ближней зоны от передатчика, а затем медленно менялся с расстоянием до 90 м, оставаясь при этом выше уровня собственных электрических шумов в воде (–135 дБм).

В 2017 году М. Тахир (Muhammad Tahir) и др. [22] рассмотрели возможные модели и механизмы сложной картины затухания электромагнитных волн в морской среде. В ближней зоне антенны доминировали токи проводимости, что вызывает высокую степень затухания. В дальней зоне доминировал диэлектрический молекулярный дипольный ток смещения, который вызывал значительно меньшие потери по затуханию. Теоретический анализ и проведенные эксперименты показали возможность подводной радиосвязи на расстояниях до 100 м в диапазоне частот 1–20 МГц при мощности передатчика 100 Вт. Сообщается, что в 2006 году был выпущен первый коммерческий подводный радиомодем S1550 от компании «Wireless Fibre Systems». Он позволял передавать данные со скоростью 100 бит/с на несколько десятков метров. В 2007 году та же компания выпустила подводный радиомодем S5550, который на расстоянии одного метра обеспечивал передачу данных со скоростями от 1 до 10 Мбит/с. В рамках проекта EMCOMM была успешно продемонстрирована связь между движущимся автономным подводным аппаратом и базовой станцией для выгрузки данных и передачи команд. Приводится пример использования подводной антенны, инкапсулированной в герметичный бокс, наполненный дистиллированной водой, с целью уменьшения потерь в ближней зоне. Работы финансировались Changchun University of Science and Technology, P.R. China.

В 2008 году Л. Лю (Lanbo Liu) с соавт. [23], ученые из Университета штата Коннектикут (США), рассмотрели физические основы и инженерные реализации эффективного обмена информацией с помощью беспроводной связи, используя физические волны в качестве носителя между узлами в подводной сенсорной сети (UWSN). Анализируется отношение удельной электропроводности и диэлектрической проницаемости морской воды как фактора, определяющего так называемую частоту перехода, равную 888 МГц. Авторы предполагают, что для частот ниже частоты перехода электромагнитное поле не является полноценной волной и ведет себя преимущественно как диффузное поле. Для частот, превышающих частоту перехода, поведение электромагнитного поля в большей степени является волновым процессом.

В 2020 году П. Асвати (P.M. Aswathy) [24] исследовал вопросы ошибок и многолучевого распространения сигнала, а также надежность подводных датчиков и сетей в целом. Указывается на возможные применения подводных сетей для обнаружения объектов на дне океана, для мониторинга окружающей среды и сбора океанографической информации, а также для задач обороны и прогнозирования стихийных бедствий.

В 2018 году российская компания ПАО «Ива» (IVA Technologies) [25] сообщила о создании электромагнитного комбинированного комплекса для подводной связи и передачи данных. Комплекс обеспечивает на расстояниях до 83 м магнитную связь, а до 2000 м гидроакустическую связь. Глубины, на которых работает система, – до 26 м.

В 2022 году Институтом физики им. Л.В. Киренского СО РАН совместно с НПП «Радиосвязь» холдинга «Радиоэлектроника» [26] на водохранилище Красноярской ГЭС продемонстрирован эксперимент по магнитной индуктивной связи в области частот до 1 МГц. Антенна диаметром около одного метра из нескольких витков провода передавала данные с глубины 93 м со скоростью 120 Кбит/с. Передатчик имел мощность 200 Вт, отношение сигнал/помеха составило 20 дБ.

В 2005 году В.П. Смагин (ВГУЭС) опубликовал работу [27], в которой излагается теория и экспериментальные результаты по исследованию электромагнитных полей в океане от береговых и корабельных акустических волн, а также от течений. Изложены результаты возникновения подводных электромагнитных шумов в океане и их источники.

В 2006 году А.Н. Шибков из Владивостока опубликовал работу [28], в которой изложил теорию и экспериментальные результаты по подводной электромагнитной связи в морской воде.

В 2021 году А.К. Томилин с соавт. [29] опубликовали результаты экспериментальных исследований по созданию подводного канала радиосвязи в морской воде на частоте 27 МГц. При мощности передатчика около 1 Вт дальность уверенного приема составила более 470 м с использованием специально сконструированных «шаровых антенн».

В 2022 году А.Ф. Лукин с соавт. [30] опубликовали результаты экспериментов, связанных с распространением в морской среде Японского моря электромагнитных волн на частоте 27 МГц. Показано, что для прямых измерений принимаемой мощности сигнала на несущей частоте, на расстоянии 80 м между приемником и передатчиком, уровень отношения сигнал/помеха составил 28,7 дБ. Удельная электропроводность морской воды составляла 4.77 См/м. Мощность передатчика радиостанции составляла около 1 Вт.

В 2023 году А.К. Томилин [31] опубликовал работу по теоретическому обоснованию экспериментов, изложенных в [29; 30].

В 2020 году А. Тарик (Auesha Tarig) и др. [32] обсудили новые методы и технологии в области подводных беспроводных сенсорных сетей (UWSN), которые используются для сбора информации под водой, мониторинга состояния среды, обмена данными с подводными аппаратами. Описано несколько архитектур средств связи и протоколов маршрутизации.

В 2020 году И. Смольянинов (Igor Smolyaninov) и др. [33] опубликовали работу, в которой представлено несколько конструкций подводных антенн, малых волновых размеров для работы на частотах 2, 50 МГц и 2,4 ГГц. Антенны обладают особенностями по улучшению связи с поверхностными электромагнитными волнами. Согласование импеданса антенн со средой обеспечивается промежуточным корпусом, заполненным деионизированной морской водой. В эксперименте был зафиксирован уверенный прием видеосигнала Wi-Fi на расстояниях, значительно превышающих расчетную глубину проникновения радиосигнала частоты 2,4 ГГц.

Т. де Пайетт (Thierry Deschamps de Paillette) и др. [34] в 2017 году опубликовали работу о конструкции подводной антенны для обслуживания датчиков подводной сенсорной сети. На основе оценок импеданса и коэффициента отражений волн была разработана петлевая антенна для диапазона 1–10 МГц, работающая с использованием эффекта ближнего поля в радиусе 5 м. В качестве диэлектрической оболочки антенны использовался резервуар с дистиллированной водой.

3. Обсуждение

Материалы, процитированные в настоящем кратком обзоре публикаций посвящены теме применения электромагнитных волн для морской подводной связи и построения подводных сетей. В совокупности они опровергают сложившееся устойчивое мнение многих специалистов о нецелесообразности практического применения электромагнитных волн в проводящих водных средах. Проведенные экспериментальные работы указывают на актуальность и практическую значимость научно-технического направления по передаче электромагнитных сигналов в водной, в том числе в морской, среде.

Полученные экспериментальные результаты по дальности уверенного приема радиосигналов в морской среде многократно превышают для разных диапазонов частот расчетные теоретические выводы о поглощении радиоволн в морской среде, которые публикуются в большинстве статей и монографий. Наблюдаемые экспериментально характеристики зависимости поглощения радиоволн в ближней и дальней зонах от антенн радиопередатчиков могут стать основой для разработки новых теорий поведения электромагнитных полей в проводящих средах.

Можно отметить два конкретных характерных явления, которые наблюдаются в экспериментах. Первое связано с характерным резким, до 80 дБ, падением мощности излучаемого передатчиком сигнала в ближней зоне, с последующим относительно медленным поглощением мощности на значительных расстояниях. Второе явление заключается в существенном повышении эффективности работы антенн в морской проводящей среде, если металлические элементы антенн окружены прослойкой из дистиллированной или пресной деионизированной воды. Можно предположить, что перспективным направлением для разработки новых электромагнитных антенн для морских применений будут антенны с многослойными диэлектрическими экранами.

Уже имеющиеся результаты проведенных работ указывают на прорывные перспективы использования электромагнитных высокочастотных волн для создания широкополосных подводных сетей, систем навигации и дистанционного обнаружения подводных объектов.

Литература

1. *Береговой А.* Направления развития средств связи подводных лодок ВМС зарубежных стран. Ч. 1 // Зарубежное военное обозрение. 2022. № 10. С. 75–80.
2. Советская система «ЗЕВС» и американская «Seafarer». URL: <https://scharapow-w.livejournal.com/177437.html>
3. *Lowell P.D.* Development of loop aeriels for Submarine radio communication // *Physics Rev.* 1919. Vol. 14. P. 193.
4. *Taylor A.* Short Wave Reception and Transmission on ground wires (Subterranean and Submarine) // *Radio Engineers, Proceedings of the Institute.* 1919. Vol. 7. P. 337–361.
5. *Batche R. R.* Loop antenna for submarines // *Wireless Age.* 1920. Vol. 7. P. 28.
6. *Moore R. K.* Theory of radio communication between submerged submarines // Ph.D. Thesis, Cornell University, 1951.
7. SEDAR—Submerged Electrode Detection and Ranging system using electric conduction fields (Braincon Corp., Marion, Mass.). Signals by electric fields // *Oceanology International.* 1969. P. 22.
8. *Turner R. W.* Submarine Communication Antenna Systems // *Proceedings of the IRE.* 1959. Vol. 47. P. 735–739.
9. Underwater radio communication // *Wireless World.* 1973. P. 80. URL: <https://worldradiohistory.com/UK/Wireless-World/60s/Wireless-World-1966-02.pdf>.
10. *Siegel M., King R. W. P.* Electromagnetic Propagation between Antennas submerged in Ocean // *IEEE Trans. Antennas Propagation.* 1973. Vol. 21. P. 507–513.
11. *Bogie I.S.* Conduction and Magnetic Signaling in the Sea. Background Review// *Radio and Electronic Engineer.* 1972. Vol. 10. P. 447–452. URL: https://journals.scholarsportal.info/details/00337722/v42i0010/447_camsitsabr.xml
12. *Butler L.* Undewater Radio Communication // *Amateur Radio.* 1987. URL: <http://www.gsl.net/vk5br/UwaterComms.htm>
13. Electromagnetic Radiation in Sea Water. Defense Technical Information Center. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA046687.pdf>
14. *Shamma-Al, Shaw A., Saman S.* Propagation of Electromagnetic Waves at MHz Frequency through Sea water // *IEEE Trans. Antennas Propagation.* 2004. Vol. 52, no. 11. P. 2843–2849.
15. *Goudevenos Apostolos.* Through Water Electromagnetic communications // The University of Liverpool. 2008. 151 p. URL: <https://livrepository.liverpool.ac.uk/3069550/1/494085.pdf>
16. *Goh J.H., Shaw A., Shamma-Al.* Underwater Wireless Communication System // *Journal of Physics: Conference Series.* 2009. Vol. 178. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/178/1/012029>; URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/178/1/012029/pdf>
17. *Nisha George, Ganesan R., Dinakardas C. N.* Design of Wide Band Antenna for Ocean Communication: Review // *International Journal of Advanced Computer Research.* 2014. Vol. 4, no. 1. Issue 14. URL: <https://www.accentjournals.org/PaperDirectory/Journal/IJACR/2014/3/34.pdf>
18. *Hattab Ghaith, El-Tarhuni Mohamed, Al-Ali Moutaz, Joudeh Tarek, Qaddoumi Nasser.* An Underwater Wireless Sensor Network with Realistic Radio Frequency Path Loss Model // Hindawi Publishing Corporation. *International Journal of Distributed Sensor Networks.* 2013. Vol. 2013, Article ID 508708, 9 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/508708>

19. *Aboderin Oluyomi*. Antenna Design for Underwater Applications // Porto University. 2019. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Antenna-Design-for-Underwater-Application-Aboderin/0c6f035be22ef1e077acd6896868699e468e884d>
20. *Lucas J., Yip C. K.* A determination of the propagation of electromagnetic waves through seawater // International Journal of the Society for Underwater Technology. 2007. Vol. 27, no. 1. P. 1–9.
21. *Yip C. K., Goudevenos A., Lucas J.* Antenna design for the propagation of EM waves in seawater // International Journal of the Society for Underwater Technology. 2008. Vol. 28, no. 1. P. 11–20.
22. *Tahir Muhammad, Piao Yan, Liu Shuo*. Channel characterization of EM waves propagation at MHz frequency through seawater // International Journal of Communication Systems. 2017. 15 p. <https://doi.org/10.1002/dac.3462/full>.
23. *Liu Lanbo, Zhou Shengli, Cui Jun-Hong*. Prospects and Problems of Wireless Communication for Underwater Sensor Networks // Wirel. Commun. Mob. Comput. 2008. P. 977–994. <https://doi.org/10.1002/wcm.654>.
24. *Aswathy P. M.* Underwater Wireless Communication // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2020. Vol. 8, no. 4. P. 1–3.
25. Подводная связь по-русски: интервью Алексея Аляшева, «ХайТэк» (IVA Tech). 02.08.2021 // URL: <https://content-review.com/articles/53251/?ysclid=m8mvvp9zwf502041339>
26. В Красноярске разработали систему связи для подводных и подземных объектов. 17.10.2022 // URL: <https://www.press-line.ru/news/2022/10/v-krasnoyarske-razrabotali-sistemu-svyazi-dlya-podvodnyh-i-podzemnyh-obektov><https://www.press-line.ru/news/2022/10/v-krasnoyarske-razrabotali-sistemu-svyazi-dlya-podvodnyh-i-podzemnyh-obektov>
27. *Смагин В. П.* Электромагнитные поля береговых, корабельных, акустических волн, течений и их использование для изучения Мирового океана : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. РГБ ОД, 71:06-1/235. Владивосток : ВГУЭС, 2005. 198 с.
28. *Шибков А. Н.* Подводная связь и навигация с использованием электромагнитного поля : дис. ... д-ра техн. наук. РГБ ОД, 71:07-5/399. Владивосток : ДВГТУ, 2006. 284 с.
29. *Томилин А. К., Лукин А. Ф., Гульков А. Н.* Эксперимент по созданию канала радиосвязи в морской среде // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47, вып. 11. С. 48–50. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/51009>; <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.11.51009.18710>
30. *Лукин А. Ф., Томилин А. К., Гульков А. Н., Кремс К. А.* Оценка характеристик канала радиосвязи в морской среде // Журнал технической физики. 2022. Т. 92, вып. 9. С. 1425–1429. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/52935>; <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.09.52935.43-22>.
31. *Томилин А. К.* Принцип организации канала подводной радиосвязи с использованием шаровых антенн // Журнал технической физики. 2023. Вып. 3. С. 397. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/54852>, <https://doi.org/10.21883/JTF.2023.03.54852.255-22>
32. *Auesha Tarig, Farooque Azam, Waseem Anwar Muhammed, Abdul Wahab Zahoor Tayybaand Muzaffar*. Recent Trends in Underwater Wireless Sensor Networks (UWSNs) – A Systematic Literature Review // Programming and Computer Software. 2020. Vol. 46, no. 8. P. 699–711.
33. *Smolyaninov I., Balzano Q., Young D.* Development of Broadband Underwater Radio Communication for Application in Unmanned Underwater Vehicles // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. Vol. 8. P. 370. <https://doi.org/10.3390/jmse8050370>&
34. *Paillette Deschamps de, Alain Gaugue, Emmanuel Parlier, Sylvain Dardenne*. Antenna Design Thierry for Underwater Wireless Telemetry Systems // 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Paris, France. 2017. P. 2251–2255. <https://doi.org/10.23919/EuCAP.2017.7928513>. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/author/37087043038>

HIGH-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC WAVES IN THE MARINE ENVIRONMENT: A BRIEF REVIEW

A.F. Lukin

*Individual researcher
Primorsky Krai, Russian Federation*

Abstract. The article presents the results of the most significant theoretical and experimental works in the field of using electromagnetic high-frequency waves in the marine environment, published in the 20th and early 21st centuries. The main characteristics of wave propagation, observed effects, and recommendations for the development and design of effective underwater antennas are briefly described.

Keywords: electromagnetic waves, marine environment, underwater antennas, radio wave attenuation, high-frequency radio waves