

11.1

**Эксперимент по созданию канала радиосвязи в морской среде**© А.К. Томилин<sup>1</sup>, А.Ф. Лукин<sup>2</sup>, А.Н. Гульков<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия<sup>2</sup>Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

E-mail: aktomilin@tpu.ru

Поступило в Редакцию 14 января 2021 г.

В окончательной редакции 10 марта 2021 г.

Принято к публикации 15 марта 2021 г.

Описан натурный эксперимент по передаче коротковолнового модулированного радиосигнала в морской среде при помощи шаровых антенн на расстояние 470 м. Специальная приемопередающая аппаратура сконструирована в соответствии с результатами обобщенной электродинамической теории. Сделано предположение о возможности создания канала высокочастотной радиосвязи в морской среде посредством продольных электромагнитных волн.

**Ключевые слова:** радиосвязь в морской среде, обобщенная электродинамика, шаровая антенна.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.11.51009.18710

Проблемы создания наземных беспроводных каналов радиосвязи успешно решены более ста лет назад, однако этого нельзя сказать о связи с автономными подводными объектами. Это объясняется значительным затуханием высокочастотных поперечных электромагнитных волн в электропроводной среде. Использование сверхнизких частот ограничено необходимостью применения крупногабаритных антенн и недостаточной скоростью передачи данных [1,2]. Для контактов с мобильными подводными объектами часто применяется гидроакустическая связь, которая также обладает существенными недостатками [3,4].

В настоящее время развивается обобщенная электродинамическая теория, учитывающая как вихревые, так и потенциальные электромагнитные процессы [5–9]. Экспериментально обнаружена потенциальная компонента магнитного поля, которую описывает скалярная функция индукции  $B^*(\mathbf{r}, t)$ . Определены условия возникновения потенциального магнитного поля и его свойства. Построена теория комплексной электромагнитной волны, описывающая ее как последовательность вихревых и потенциальных процессов. В результате вихревых процессов возникают поперечные электромагнитные волны, определяемые векторами  $\mathbf{E}_{rot}$  и  $\mathbf{H}$ . Потенциальные процессы генерируют продольные электромагнитные волны, для описания которых используются скалярный потенциал электрического поля  $\phi(\mathbf{r}, t)$  и скалярная функция  $B^*(\mathbf{r}, t)$ . Поскольку электрический потенциал определяет потенциальное электрическое поле ( $\mathbf{E}_{grad} = -\nabla\phi$ ), продольные электромагнитные волны принято называть электроскалярными (или скалярно-продольными) [7–9].

Цель настоящей работы — экспериментальная проверка возможности создания канала коротковолновой радиосвязи на продольных волнах в морской среде.

Чтобы технически осуществить радиосвязь в морской среде, нужно создать нестационарное сферически-симметричное электрическое поле с высокой напряжен-

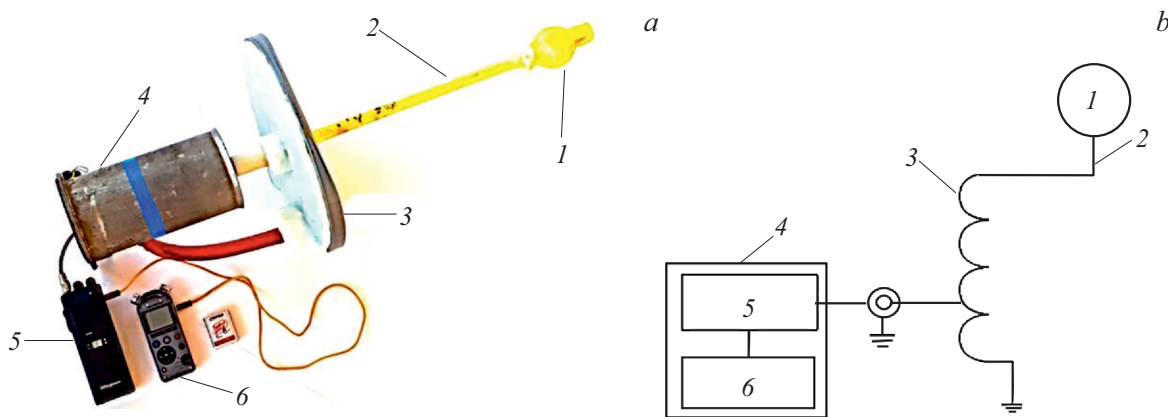
ностью. Это возможно за счет явления безвихревой электромагнитной индукции [5–9], которое описывается дифференциальным уравнением

$$\nabla \cdot \mathbf{E}_{grad} = \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon'} + \frac{\partial B^*}{\partial t}. \quad (1)$$

Из уравнения (1) следует, что потенциальное электрическое поле можно генерировать не только при помощи электрических зарядов плотности  $\rho$ , но и за счет нестационарного потенциального магнитного поля, которое создает квазизаряд плотности  $\epsilon_0 \epsilon' \partial B^* / \partial t$ . В монографии [5] описаны эксперименты, подтверждающие этот феномен.

Реализовать технически эту идею можно с помощью плоской спиральной катушки Тесла при пропускании по ней нестационарного тока [5,8,9]. В ее центре создается нестационарный квазизаряд высокой плотности. Если центр катушки соединить с металлической сферой, то на ней возникнет потенциал  $\phi(t)$ , изменяющийся с большой амплитудой. Это позволяет создать вокруг сферы сильное потенциальное электрическое поле. Оно является нестационарным и имеет радиальную структуру.

На основе теории, изложенной в монографии [5], разработана методика расчета параметров приемопередающей аппаратуры, изготовлены экспериментальные образцы (рис. 1). Катушка Тесла диаметром 320 мм имеет 27 витков медного провода диаметром 2 мм. Центральный виток катушки соединен металлической штангой с медным шаром диаметром 60 мм. На вход передающей антенны подается сигнал с выхода радиостанции „Штурман-882М“ на частоте 27.4 МГц, модулированный по амплитуде частотой „тонального вызова“, спектр которого находится в полосе частот около 498–511 Hz. Мощность радиостанции на излучение составляет 1.17 W. Действующее высокочастотное напряжение на выходе передатчика при работе на реальную нагрузку составляет 7.66 V. Действующая сила тока



**Рис. 1.** Экспериментальный образец приемной станции (а) и ее электрическая схема (b). 1 — сфера из меди (антенна), 2 — штанга, 3 — катушка Тесла, 4 — герметичный металлический бокс, 5 — радиостанция, 6 — цифровой диктофон.

в катушке 0.15 А. В результате трансформации в катушке Тесла амплитуда высокочастотного напряжения на шаровой антенне составляет примерно 45 В. Это соответствует нестационарному заряду, изменяющемуся с амплитудой  $12.5 \cdot 10^{-9}$  С, который генерируется на медном излучающем шаре, находящемся в водной среде.

Радиостанция вместе с батареями электропитания помещена в герметичный бокс, жестко сопряженный с антенной. Все элементы антенны изолированы слоем диэлектрика от контакта с морской водой. Приемная станция имеет аналогичную конструкцию. В ней сигнал модуляции с разъема наушников радиостанции подается на вход диктофона „Olympus LS-12“, размещенного в герметичном боксе.

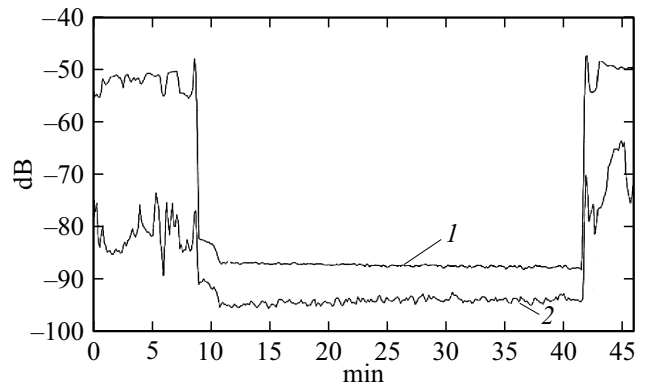
Проведена серия экспериментов с постепенным увеличением дальности передачи сигнала. В работе представлены данные об испытаниях, которые проводились 27 октября 2020 г. во Владивостоке, в бухте Новик (остров Русский). Приемная станция была установлена на заякоренном буе на глубине 6 м. Глубина моря в этом месте составляет 13 м. Проводимость морской воды в районе испытаний 4.77 S/m. Температура воды +8°С. Как приемная, так и передающая станция опускались в воду на капроновых фалах, не имеющих металлических частей. Этим обеспечивалась полная электромагнитная автономность обоих модулей в погруженном состоянии. Передающая станция была полностью погружена в морскую среду и находилась на глубине 4 м от поверхности моря. С 9-й по 40-ю минуту передающая станция равномерно буксировалась катером по направлению от приемного модуля. Расстояние между станциями измерялось с помощью GPS-приемника.

Записанный на диктофон сигнал обрабатывался с использованием спектрального анализа в окне длительностью 30 с с шагом окна 7.5 с с весовым окном Гаусса. Рассчитана средняя мощность сигнала „тонального вызова“ для модулирующего сигнала (МС) передающей радиостанции в полосе частот 498–511 Hz, приведенная к полосе частот 1 Hz. Для сравнения в полосе частот 515–520 Hz, где отсутствовали компоненты частот сиг-

нала „тонального вызова“, рассчитана средняя мощность фоновых шумов (МФ), также приведенная к полосе частот 1 Hz. Спектральный анализ записи на диктофон сигнала от калиброванного и поверенного звукового генератора позволил пересчитать уровни МС и МФ в dB относительно уровня мощности  $1 \mu\text{W}$ , приведенной к полосе частот 1 Hz. Полученные результаты в зависимости от времени эксперимента представлены на рис. 2.

Приемный модуль находился в морской воде с 9-й по 43-ю минуту записи. Расстояние между передающим и приемным модулями изменялось от 20 м на 9-й минуте записи до максимального 470.7 м на 40-й минуте. Средний уровень МС за время протяжки поддерживался пределах от -87 до -88 dB в результате работы автоматической регулировки усиления в приемной радиостанции. Средний уровень МФ за это же время изменялся в пределах от -95 до -93 dB. Таким образом, зафиксированный в эксперименте уровень превышения МС над уровнем МФ составил 5–8 dB относительно  $1 \mu\text{W}$  в полосе частот 1 Hz.

С нулевой по 9-ю минуту записи и с 43-й по 46-ю минуту записи передающий модуль оставался в морской воде, а приемный модуль был на борту катера. В эти



**Рис. 2.** Средняя мощность принимаемого сигнала (1) и фоновых шумов (2) относительно мощности  $1 \mu\text{W}$ , приведенной к полосе частот 1 Hz.

периоды времени уровень МС изменялся в пределах от  $-48$  до  $-55$  dB. При этом уровень МФ изменялся в пределах от  $-74$  до  $-89$  dB до начала протяжки и от  $-64$  до  $-81$  dB после ее окончания. Таким образом, был зафиксирован факт уверенной передачи сигнала из воды в воздух при распространении радиосигнала на расстояние  $4$  m в воде и около  $3$  m в воздухе с превышением уровня МС над уровнем МФ на  $20$  dB и более. В других экспериментах также была зафиксирована передача радиосигнала из воздушной среды в морскую.

Расчетное затухание уровня мощности радиосигнала для поперечных волн на расстоянии  $1$  m в морской среде с проводимостью  $4.77$  S/m на частоте  $27.4$  MHz составляет около  $195$  dB/m. Для расстояния  $470$  m суммарное затухание должно составлять около  $91\ 650$  dB, что многократно превышает запас помехоустойчивости используемых радиостанций. Однако канал подводной радиосвязи на этом расстоянии реально работает. Следовательно, можно предположить, что радиосигнал передается в морской воде при помощи продольных (электроскалярных) волн.

Таким образом, экспериментально в натуральных условиях доказана возможность создания канала высокочастотной радиосвязи в морской среде. Предположительно это происходит с использованием электроскалярных волн. Обнаружен эффект передачи высокочастотного радиосигнала через границу раздела двух сред: морская вода—воздух.

## Благодарности

Теория и техника эксперимента, а также результаты испытаний неоднократно обсуждались на рабочих совещаниях с участием специалистов из АО „Корпорация „Московский институт теплотехники“ (Москва) и ПАО „Дальприбор“ (Владивосток). Авторы выражают благодарность сотрудникам этих организаций за поддержку и полезные советы.

## Финансирование работы

Работа выполнена в рамках программ повышения конкурентоспособности ТПУ и ДВФУ.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] В.Г. Максименко, Радиотехника и электроника, **65** (2), 141 (2020). DOI: 10.31857/S0033849420020138
- [2] Г.Я. Шайдуров, Г.Н. Романова, Д.С. Кудинов, Радиотехника и электроника, **65** (8), 757 (2020). DOI: 10.31857/S0033849420070116
- [3] В.П. Федосов, С.П. Тарасов, В.В. Воронин, С.В. Кучерявенко, П.П. Пивнев, А.А. Легин, А.В. Ломакина, В.А. Франц, *Сети связи для подводных автономных роботизированных комплексов* (Изд-во ЮФУ, Ростов н/Д—Таганрог, 2018).
- [4] С.В. Душин, С.С. Шаврин, В.С. Алешин, М.П. Фархадов, DSPA: Вопр. применения цифровой обработки сигналов, **10** (2), 11 (2020).
- [5] А.К. Томилин, *Обобщенная электродинамика* (Триумф, М., 2020). DOI: 10.32986/978-5-93673-270-6-2020-04
- [6] А.К. Tomilin, in *Progress in Electromagnetics Research Symp.—Spring (PIERS)* (St. Petersburg, 2017), p. 1414. DOI: 10.1109/PIERS.2017.8261969
- [7] Е.И. Нефедов, *Электромагнитные поля и волны* (Академия, М., 2014).
- [8] L.M. Hively, *Systems, apparatuses, and methods for generating and/or utilizing scalar-longitudinal waves. Patent US 9306527B1* (Apr. 5, 2016) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/US9306527B1/en>
- [9] D. Reed, L.M. Hively, *Symmetry*, **12** (12), 2110 (2020). DOI: 10.3390/sym12122110