

## Обоснование концепции системы связи диапазона средних волн в подземных квазиодномерных сооружениях

Д.В. Федосов , А.В. Колесников 

НПО «КВ-СВЯЗЬ»  
644012, г. Омск, Россия,  
пр. Академика Королева, 32

**Аннотация – Обоснование.** Современное развитие горнодобывающей промышленности характеризуется поиском новых технологий добычи, повышением сложности, глубины, масштабов выработок и опасности работы, что приводит к поиску подходов в построении информационно-коммуникационных систем с повышенным функционалом, а именно – с возможностью объединения в единую систему средств автоматизации горных работ, датчиков, проходческого оборудования, аппаратуры связи, навигации, управления, аппаратуры, работающей в аварийной обстановке. Поскольку большинство подземных объектов можно считать квазиодномерными (шахты, рудники, метро, коллекторы), для организации передачи данных в них могут эффективно использоваться проложенные вдоль туннелей линии передачи. **Цель.** Рассмотреть физическую сторону работы информационно-коммуникационной системы в диапазонах средних и коротких волн. **Методы.** Зависимость напряженности поля в туннеле с однопроводной и двухпроводной линиями, проложенными в туннеле, получены с помощью электродинамического моделирования методом конечных элементов. **Результаты.** Приведены значения затухания в выработках с различными параметрами среды и зависимости затухания, полученные экспериментально в угольной шахте. В среднем затухание сигнала составляет 15 дБ на 1 км. **Заключение.** Цифровая средневолновая система на основе двухпроводных линий имеет существенные преимущества при развертывании перед системами УКВ-связи. Она может быть использована в качестве базовой, а при необходимости – дополнена УКВ-технологиями (Bluetooth, Wi-Fi), например для работы персонала с использованием взрывозащищенного смартфона и в тех областях, где требуется повышенная пропускная способность, в местах активного ведения горных работ в шахтах и концентрации технологического оборудования и персонала.

**Ключевые слова** – подземная связь; направляющая линия; система связи; средние волны.

### Постановка проблемы

Под квазиодномерными (КПС) понимаются подземные сооружения, такие как рудники и шахты, туннели метро, коллекторы и подобные, длина которых много больше поперечных размеров.

Организация связи и навигации в КПС требует выбора наиболее приемлемого решения по ряду параметров:

- функциональности,
- дальности беспроводной связи,
- надежности передачи информации,
- многоканальности,
- ширины полосы используемых каналов связи,
- себестоимости установки и стоимости содержания (для системы связи),
- точности позиционирования (для навигационных систем),
- ремонтпригодности.

Для работы предприятия в штатном режиме на рынке представлено несколько продуктов – систем связи УКВ-диапазона. Они строятся на основе беспроводных приемопередатчиков у подвижных абонентов, интегрированных в систему либо с использованием проложенного вдоль туннеля

излучающего кабеля, либо через базовые станции (БС) [1; 2]. Взаимодействие БС друг с другом ведется по кабельным линиям. Дорожно-транспортные происшествия, взрывы метана, обрушение породы, обрывы кабельной инфраструктуры и другие чрезвычайные происшествия несут риски для предприятия и персонала и часто выводят из строя штатные системы связи.

При проведении аварийно-спасательных операций используются проводные средства связи и беспроводная связь диапазона средних волн (СВ). Для связи горноспасательных отрядов в России (отряды военизированных горноспасательных частей) используются голосовой канал связи и система кодовых сообщений, включающая около 30 команд. Это может быть реализовано с помощью проводной голосовой связи, а при использовании дыхательного аппарата при проведении спасательных работ возможна подача телеграфных сигналов из длинных и коротких нажатий на тангенту. Более расширенный функционал может обеспечить радиостанция FERRA, работающая на частоте 1 МГц с шириной полосы 2500 кГц и с перестройкой резонансной частоты от 950

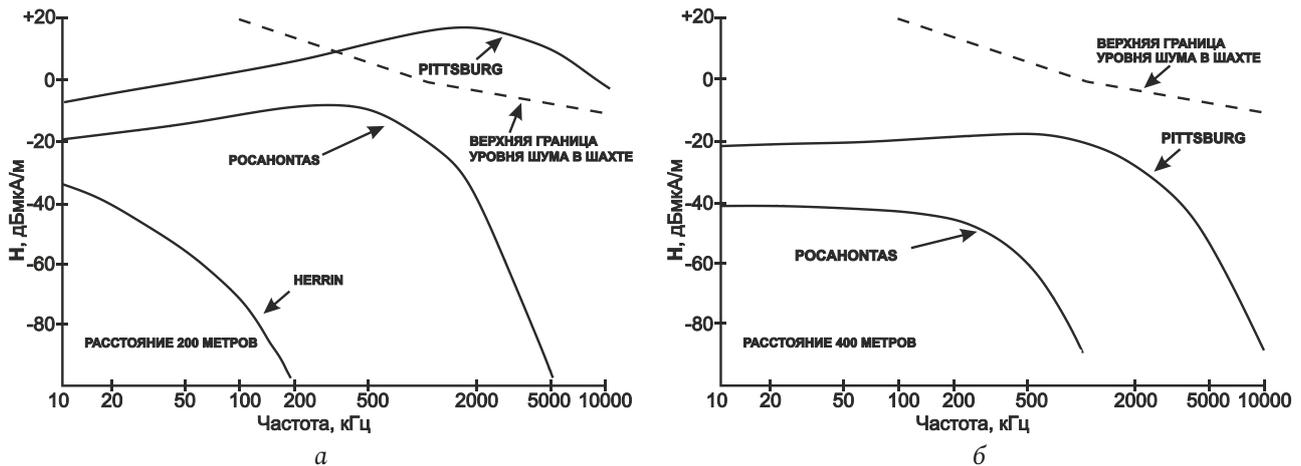


Рис. 1. Зависимости напряженности поля и уровня шумов от частоты для угольных пластов Питтсбурга, Покахонтаса и Херрина (США) на расстоянии (а) 200 м и (б) 400 м [4]  
 Fig. 1. Dependence of field strength and noise level on frequency for coal seams of Pittsburgh, Pocahontas and Herrin (USA) at a distance of (a) 200 m and (b) 400 m [4]

до 1050 кГц [1]. Она предоставляет возможность общения голосом, а также пересылку более 40 озвучиваемых и выводящихся на экран кодовых сообщений, в том числе и с цифровой информацией (концентрация газов, расстояние и т. п.). При этом для передачи сигналов не требуется гальванического соединения с телефонным кабелем, т. к. используется возбуждение направляющих линий.

Направляющие линии (НЛ) – это протяженные металлические проводники (провода, трубы, троллейные линии, кабели с металлической оболочкой), проложенные вдоль горных выработок. Физический процесс распространения радиоволн диапазона СВ вдоль однопроводных НЛ (ОНЛ) в сухих рудниках с низкой проводимостью породы близок к известному процессу распространения УКВ электромагнитных волн вдоль однопроводных линий (линии Зоммерфельда, Губо – Хармса). Данный эффект был использован при создании аппаратуры аварийной или дополнительной связи и позволяет организовывать радиоканалы на несколько километров вдоль НЛ [1; 3; 4]. Для этого используется непосредственное подключение радиостанции к линии либо возбуждение бегущей волны ОНЛ в зоне индукции электрически малой антенной радиостанции.

Проложенная в выработке НЛ может быть использована в качестве среды распространения сигнала для перспективных систем связи диапазона СВ. Отличительной особенностью каналов связи с НЛ является сохранение работоспособности в случае обрыва НЛ из-за обвала, взрыва, чрезвычайного происшествия. Длина волны  $\lambda$  в свободном пространстве на частоте 1 МГц состав-

ляет 300 м, в полупроводящей породе с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 9$ ,  $\lambda_\epsilon = 100$  м. За счет индукционной связи электромагнитные поля могут проникать сквозь даже достаточно протяженный, до нескольких метров, слой породы, что позволяет связываться абонентам по обе стороны обрыва. Последний эффект крайне важен, т. к. это позволяет сохранить связь с горнорабочими, оказавшимися отрезанными завалом.

Поскольку передача энергии в ОНЛ антенной производится с большими потерями, лучший КПД передачи может быть достигнут с помощью согласующих устройств, таких как [5], с КПД передачи около 10 %.

На рис. 1 приведены графики принимаемой напряженности поля на расстояниях от передатчика 200 и 400 м соответственно для рамочной антенны с площадью витков  $1 \text{ м}^2$  в активных зонах угольных шахт и верхняя граница уровня шума, полученные в работе [4]. Заметны рост шума на низких частотах и снижение напряженности поля на более высоких.

На рис. 2 показаны данные из [4], полученные в трех шахтах возле проводников, которые иллюстрируют, что существуют оптимальные частоты около 1000 кГц для передачи сигналов. Более высокая частота приводит к большему затуханию сигналов вдоль линии из-за снижения длины волны, на более низких частотах возрастает уровень шума, снижающий отношение сигнал/шум. Стоит отметить, что качество электроэнергии – один из важных факторов для работы систем связи и включает не только вопрос фильтрации шума в радиооборудовании, но и стабильность работы систем вторичного электропитания [6].

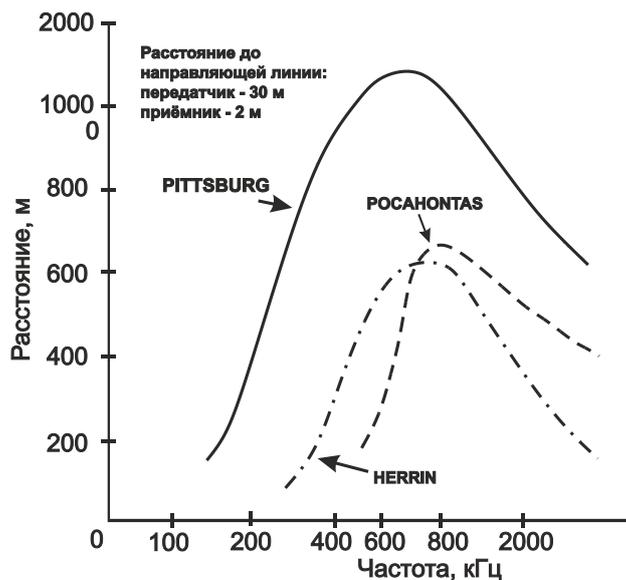


Рис. 2. Частотная зависимость дальности связи вдоль направляющих линий с помощью СВ-радиостанций с магнитными антеннами [4]

Fig. 2. Frequency dependence of the communication range along guide lines using MW radio stations with magnetic antennas [4]

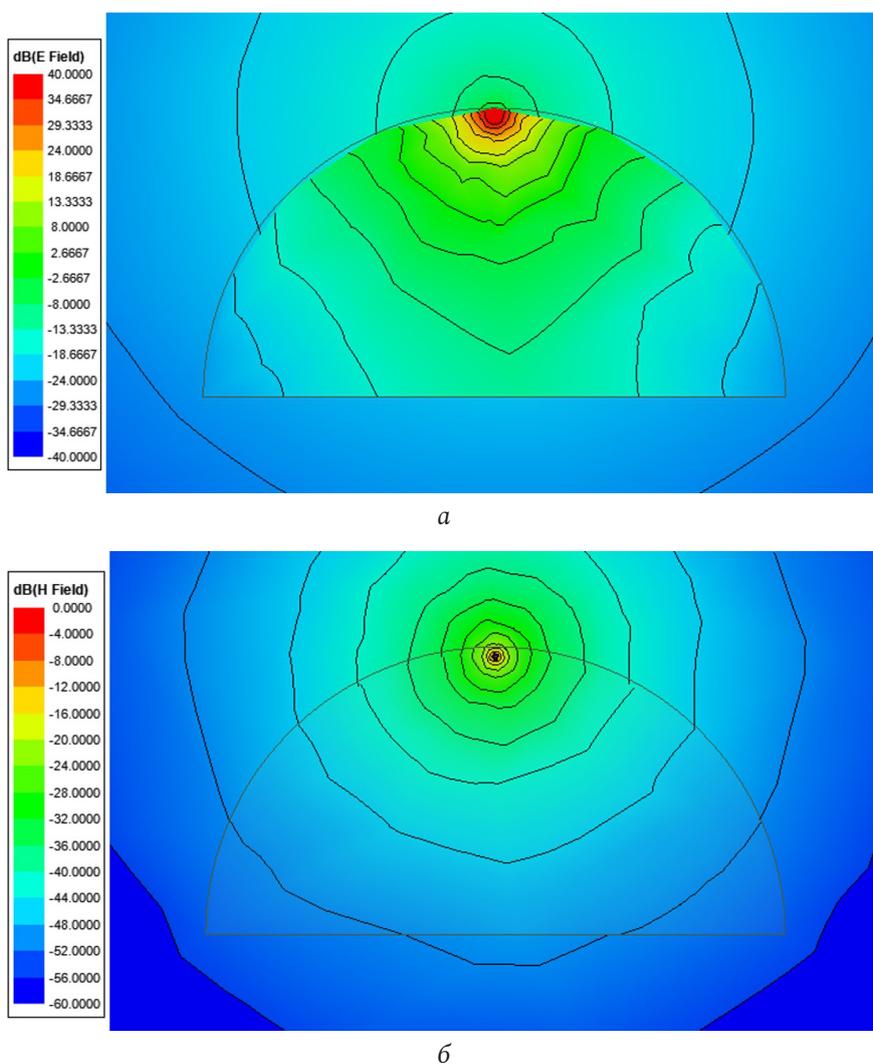


Рис. 3. Визуализация картины поля в туннеле полуцилиндрической формы с радиусом 2 м на частоте 1 МГц для однопроводной НЛ: а – электрическое поле; б – магнитное поле

Fig. 3. Visualization of the field pattern in a semi-cylindrical tunnel with a radius of 2 m at a frequency of 1 MHz for a single-wire GL: а – electric field; б – magnetic field

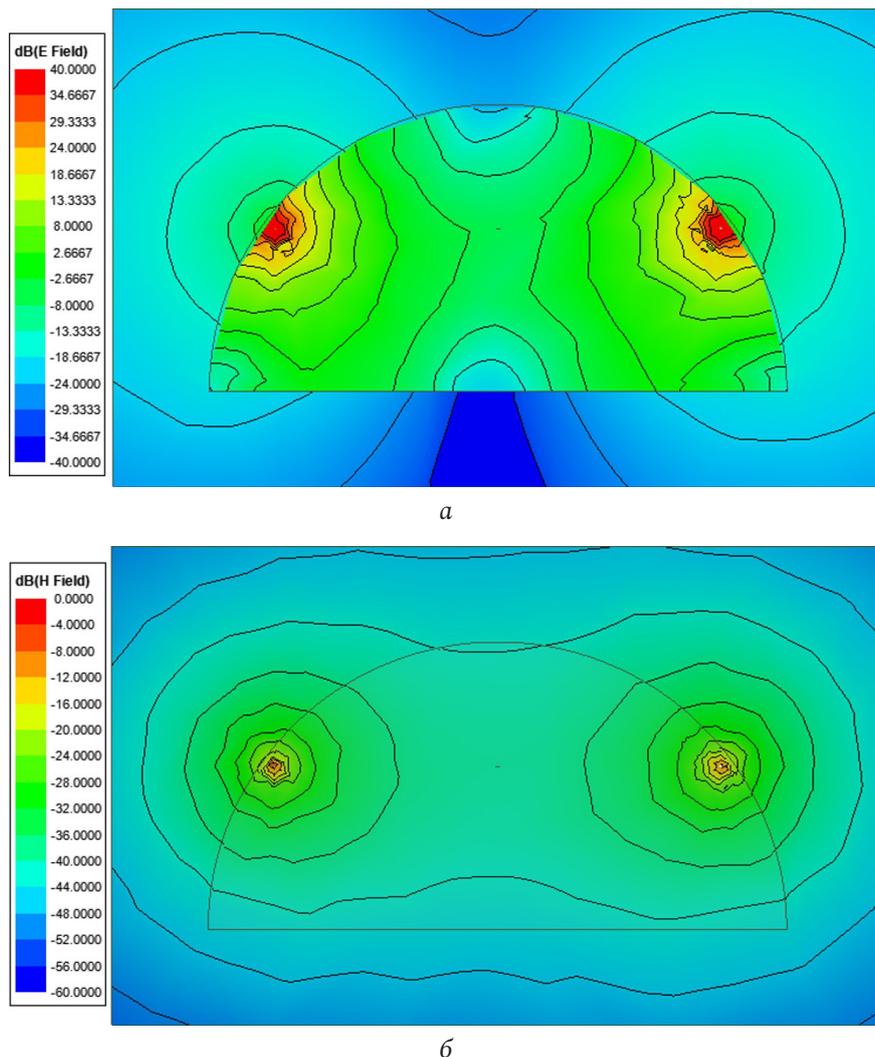


Рис. 4. Визуализация картины поля в туннеле полуцилиндрической формы с радиусом 2 м на частоте 1 МГц для ДНЛ: а – электрическое поле; б – магнитное поле

Fig. 4. Visualization of the field pattern in a semi-cylindrical tunnel with a radius of 2 m at a frequency of 1 MHz for a two-wire GL: a – electric field; b – magnetic field

Для расширения функциональных возможностей средств связи для повседневной работы могут быть спроектированы системы передачи информации и навигации, основой которых в диапазоне СВ являются направляющие линии.

### Сравнение одно- и двухпроводных НЛ

На рис. 3 приведены картины напряженности электрического (а) и магнитного (б) поля в сечении туннеля с ОНЛ, полученные моделированием методом конечных элементов (МКЭ) [7] при следующих параметрах модели:

- туннель в модели свободен от других проводников и неоднородностей;
- мощность источника 1 Вт;
- срез произведен на расстоянии 10 м от источника;
- радиус полуцилиндра 2 м;

– расстояние между проводником и породой – 100 мм;

– характеристики породы: диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 10$ , электропроводность  $\sigma = 0,01$  См/м.

На рис. 4 приведены характерные картины напряженности электрического (а) и магнитного (б) поля в сечении туннеля с двухпроводной НЛ (ДНЛ) при тех же параметрах модели и расстоянием от проводников до породы 80 мм, а на рис. 5 – зависимости напряженности электрической и магнитной компонент поля на различных частотах для ОНЛ и ДНЛ.

С инженерной позиции возможно стабильное согласование аппаратуры с ДНЛ, а в сечении КПС поле между противоположными проводниками ДНЛ достаточно равномерно (в сравнении с ОНЛ). Последнее позволяет организовать устойчивую

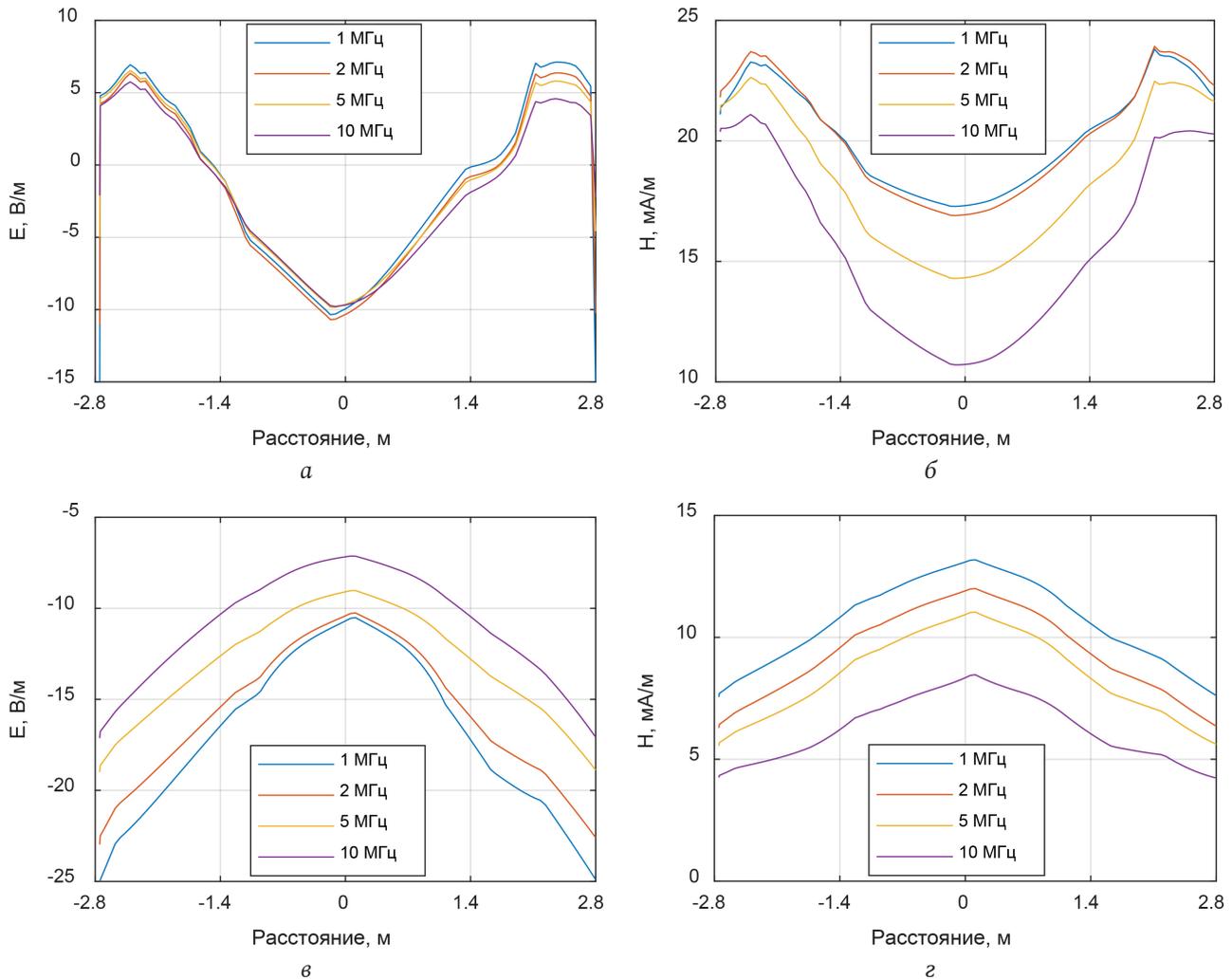


Рис. 5. Зависимость напряженности поля на высоте 1 м на разных частотах для двухпроводной линии (а, б), для однопроводной линии (в, г)

Fig. 5. Dependence of field strength at a height of 1 m at different frequencies for a two-wire line (a, b), for a single-wire line (v, g)

Таблица. Значения коэффициента передачи  $K_{12}$  (без учета рассогласования)  
 Table.  $K_{12}$  gain values (without mismatch)

| Частота, МГц | Коэффициент передачи $K_{12}$ , дБ     |  |                                       |
|--------------|--|--|---------------------------------------|
|              | $\varepsilon = 10, \sigma = 0,01$ См/м | $\varepsilon = 20, \sigma = 0,01$ См/м | $\varepsilon = 25, \sigma = 0,1$ См/м |
| 1            | -11,3                                  | -12,8                                  | -21                                   |
| 2            | -46                                    | -50                                    | -55                                   |
| 3            | -90                                    | -98                                    | -89                                   |

связь с подвижным персоналом и транспортно-технологическим оборудованием.

В таблице приведены значения коэффициента передачи  $K_{12}$  (без учета рассогласования) участка ДПЛ для разных частот, полученные моделированием МКЭ:

$$K_{12} = \frac{|S_{12}|}{(1 - |S_{11}|)(1 - |S_{22}|)},$$

где  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  – S-параметры отражения первого и второго источников (портов) и  $S_{12}$  – S-параметр

передачи, выраженные в дБ. Значительный рост затухания при повышении частоты вдоль ДПЛ обусловлен ростом погонного затухания, обусловленного кратным увеличением электрических размеров ДПЛ и затухания в среде. Высокие значения затухания соответствуют наихудшим сценариям: сильно обводненным средам с повышенной диэлектрической проницаемостью породы [8].

На рис. 6 приведены относительные зависимости нормированного уровня сигнала, измерен-

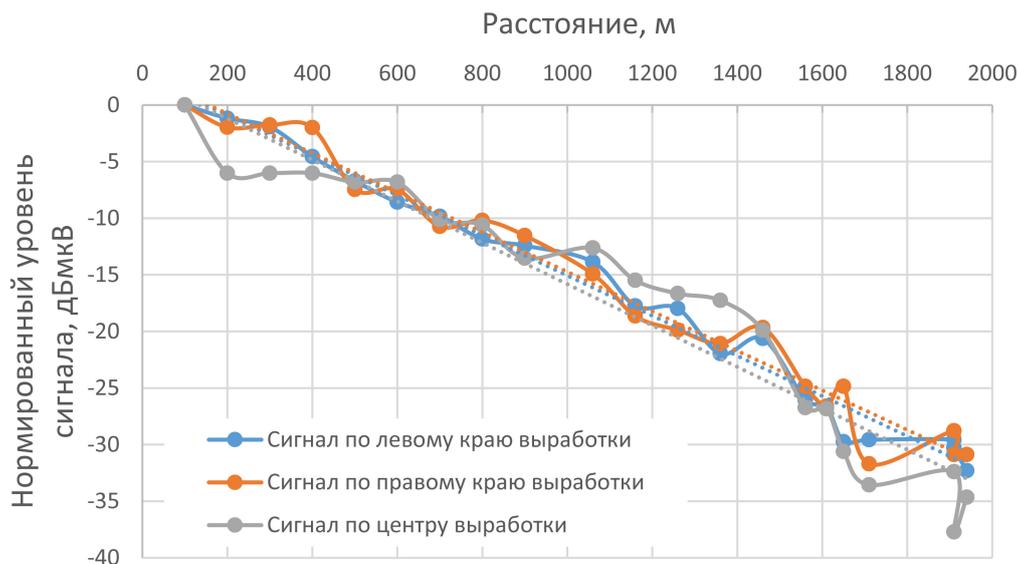


Рис. 6. Зависимости затухания сигнала в угольной шахте  
Fig. 6. Signal attenuation in a coal mine

ные в угольной шахте им. Рубана (Кемеровская область) специалистами НПООО «КВ-СВЯЗЬ» совместно с ВГСЧ МЧС России. Использовалась станция Fecca L1 Ex, согласованная с двухпроводной линией, проложенной вдоль горной выработки в угольном пласте, на частоте 1 МГц в полосе 2,5 кГц. При этом измерения вдоль выработки проводились портативной радиостанцией с мобильной антенной магнитного типа без подключения к линии у левого, правого края выработки и по центру. Измерения проводились весной при высокой влажности породы. В среднем затухание сигнала составляет 15 дБ на 1 км, что соответствует модели. Таким образом, использование более высоких частот для систем связи с использованием НС нецелесообразно.

Выбор частотного диапазона системы связи обусловлен несколькими факторами:

- при повышении частоты возрастает затухание вдоль однопроводной линии в окружающем пространстве и из-за повышения электрической длины линии;
- при снижении частоты падает КПД электрически малых антенн ПА;
- при снижении частоты возрастает уровень промышленного и естественного шума;
- возможно использование совместимой по диапазону спасательной аппаратуры диапазона СВ.

Анализируя полученные данные и работы [1-4; 8-10], стоит констатировать, что оптимальный диапазон для СВ связи вдоль ДНЛ в большинстве шахт находится около 1 МГц, а наилучшим вариантом для построения систем связи являются

ДНЛ. Варианты таких систем связи защищены патентами [11; 12].

### Структурная схема системы

Структурная схема системы связи с ДНЛ в КПС представлена на рис. 7. Все БС связаны между собой через ДНЛ и связаны с центром (диспетчерской). Подвижный абонент (ПА) перемещается вдоль подземного сооружения, находясь в СВ-поле ДНЛ. Связь с ПА обеспечивает персональная малогабаритная приемопередающая СВ-радиостанция (абонентский терминал). Технологическая машина (ТМ) и другое дополнительное оборудование (датчики систем освещения, состава воздуха, вентиляции и пр.) могут быть связаны с БС с помощью СВ-канала. Опрос датчиков технологического оборудования абонентским терминалом может быть осуществлен с помощью Bluetooth. Потенциально возможны совмещение с различными датчиками и расширение до локальных сенсорных сетей, ключевой проблемой при этом будет учет влияния окружающей среды на эффективность работы аппаратуры [13].

Особенностью функционирования физического уровня такой системы является повышенная стойкость к аварийным ситуациям. В частности, данная система может сохранять работоспособность даже при обрыве ДНЛ. Экспериментально установлено, что разрыв одного проводника ДНЛ приводит к потере в коэффициенте передачи  $K_{12}$  около 3 дБ, а двух проводников - от 15 до 30 дБ в зависимости от размеров области разрыва. Такая система может быть совместима с цифровым

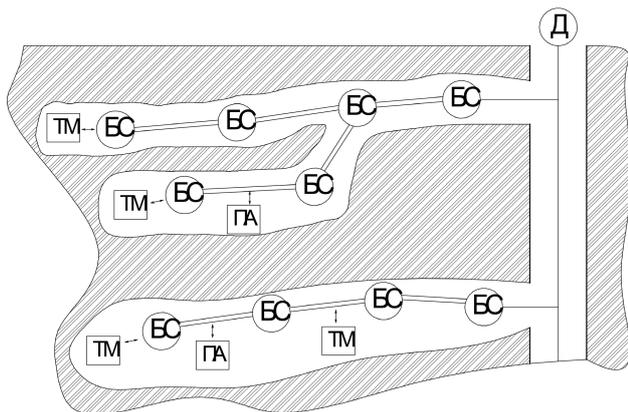


Рис. 7. Участок системы связи с ДНЛ: Д – диспетчерская, БС – базовая станция, ПА – подвижный абонент, ТМ – технологическая машина

Fig. 7. Section of the communication system with a two-wire GL: D – control room, BS – base station, PA – mobile subscriber, TM – technological machine

оборудованием горноспасательных отрядов, что значительно облегчает проведение аварийно-спасательных мероприятий.

В дальнейшем авторы планируют провести анализ модели ДНЛ при различных условиях эксплу-

атации, неоднородностях, нерегулярности линии (переменном сечении), разветвлении и при возникновении обрывов, также будут подробно раскрыты каналный и системный уровни функционирования системы связи, интегрирование с технологией Bluetooth.

## Заключение

В статье рассмотрены основные особенности физического уровня технологий передачи данных, связи и навигации в подземных сооружениях в диапазоне СВ. Показано, что система на основе двухпроводных линий имеет существенные преимущества при развертывании. Такая цифровая средневолновая система связи может быть использована в качестве базовой, а при необходимости дополнена УКВ-технологиями (Bluetooth, Wi-Fi) в тех областях, где требуется повышенная пропускная способность, например в местах активного ведения горных работ в шахтах и концентрации технологического оборудования и персонала.

## Список литературы

1. Обзор способов организации подземной связи и перспективы использования диапазона средних волн в шахтах / Д.В. Федосов [и др.] // Труды НИИР. 2022. № 1. С. 19–36. DOI: <https://doi.org/10.34832/NIIR.2022.8.1.003>
2. A survey of wireless communications and propagation modeling in underground mines / A.E. Forooshani [et al.] // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2013. Vol. 15, no. 4. P. 1524–1545. DOI: <https://doi.org/10.1109/SURV.2013.031413.00130>
3. Корчагин Ю.А., Саломатов В.П., Чернов А.А. Радиосвязь в проводящих средах. Новосибирск: Наука, 1990. 148 с.
4. Sacks H.K., Chufo R.L. Medium-frequency propagation in coal mines // Proceedings of the Fourth WVU Conference on Coal Mine Electrotechnology. 1978. P. 1–12. URL: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/works/cover-sheet225.html>
5. Патент RU 191121 U1. Многодиапазонное устройство подключения для индукционной связи / Д.В. Федосов, Р.А. Бекишев; 25.07.2019.
6. Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В. Основные научные проблемы построения отечественных агрегатированных (сложных) приборов и распределенных систем вторичного электропитания и причины отставания их характеристик от современных зарубежных аналогов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2018. Т. 21, № 3. С. 7–11. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7011>
7. Чебышев В.В. Основы проектирования антенных систем. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 150 с.
8. Колесников А.В., Федосов Д.В., Николаев А.В. Влияние климато-геофизических факторов на характеристики подземного канала беспроводной связи сквозь горную породу // Электромагнитные волны и электронные системы. 2022. № 4. С. 5–13. URL: [http://radiotec.ru/journal/Electromagnetic\\_Waves\\_and\\_Electronic\\_Systems/number/2022-4/article/22926](http://radiotec.ru/journal/Electromagnetic_Waves_and_Electronic_Systems/number/2022-4/article/22926)
9. Dobroski H.N., Stolarczyk L.G. A whole-mine medium-frequency radio communication system // The Sixth WVU Conference on Coal Mine Electrotechnology. 1982. P. 1–13 URL: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/works/cover-sheet1525.html>
10. Lagace R.L., Emslie A.G., Grossman M.A. Modeling and Data Analysis of 50 to 5000 kHz Radio Wave Propagation in Coal Mines. Cambridge: Arthur D. Little, Inc., 1980. 238 p. URL: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/works/cover-sheet179.html>
11. Патент RU 2642845 C1. Способ и система мобильной связи для протяженных объектов / Д.В. Федосов; 29.01.2018.
12. Патент RU 2672273 C1. Коммуникационная система для подземных сооружений / С.Э. Лапин, А.Г. Бабенко, Д.В. Федосов; 13.11.2018.
13. Парфенов В.И., Ле В.Д. Анализ влияния окружающей среды на эффективность алгоритма обработки информации в беспроводных сенсорных сетях // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23, № 2. С. 49–54. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.2.49-54>

## Информация об авторах

Федосов Дмитрий Витальевич, кандидат технических наук, генеральный директор НПО «КВ-СВЯЗЬ», г. Омск, Россия.  
Область научных интересов: разработка систем связи и антенн в материальных средах.

E-mail: xferra@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5904-2710>

**Колесников Андрей Викторович**, инженер антенного оборудования НПО «КВ-СВЯЗЬ», г. Омск, Россия.

Область научных интересов: антенные устройства различных диапазонов частот, теория и техника радиолиний в слабопроводящих средах.

E-mail: kolesnikov.radio@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9048-2899>

## Physics of Wave Processes and Radio Systems

2023, vol. 26, no. 3, pp. 89–97

DOI [10.18469/1810-3189.2023.26.3.89-97](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.3.89-97)

UDC 621.396

Original Research

Received 25 April 2023

Accepted 29 May 2023

Published 27 September 2023

### Substantiation of the concept of a communication system in the range of medium waves in underground quasi-one-dimensional structures

Dmitry V. Fedosov , Andrey V. Kolesnikov 

RPSLL «HF-Communication»  
32, Akademika Koroleva Avenue,  
Omsk, 644012, Russia

**Abstract – Background.** The modern development of the mining industry is characterized by the search for new mining technologies, increasing the complexity, depth, scale of workings and the danger of work, which leads to the search for approaches in building information and communication systems with increased functionality, namely, with the possibility of combining into a single system of mining automation tools, sensors, tunneling equipment, communication equipment, navigation, controls, equipment operating in an emergency situation. Since most underground facilities can be considered quasi-one-dimensional (mines, subways, sewers), transmission lines laid along tunnels can be effectively used to organize data transmission in them. **Aim.** Consider the physical side of the operation of the information and communication system in the medium and high frequency ranges. **Methods.** The dependence of the field strength in a tunnel with single-wire and bifilar lines laid in the tunnel was obtained using electrodynamic modeling by the finite element method. **Results.** The values of attenuation in workings with different medium parameters and attenuation dependences obtained experimentally in a coal mine are given. On average, the signal attenuation is 15 dB per 1 km. **Conclusion.** A digital medium-wave system based on bifilar lines has significant advantages when deployed over VHF communication systems. It can be used as a base, and if necessary, supplemented with VHF technologies (Bluetooth, Wi-Fi), for example, for personnel using an explosion-proof smartphone, and in areas where increased throughput is required, in places of active mining operations in mines and concentration of technological equipment and personnel.

**Keywords** – underground communication; guide line; communication system; medium wave.

✉ kolesnikov.radio@yandex.ru (Andrey V. Kolesnikov)

 © Dmitry V. Fedosov, Andrey V. Kolesnikov, 2023

## References

1. D. V. Fedosov et al., “Review of methods for organizing underground communications and prospects for using the medium wave range in mines,” *Trudy NIIR*, no. 1, pp. 19–36, 2022, doi: <https://doi.org/10.34832/NIIR.2022.8.1.003>. (In Russ.)
2. A. E. Forooshani et al., “A survey of wireless communications and propagation modeling in underground mines,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 4, pp. 1524–1545, 2013, doi: <https://doi.org/10.1109/SURV.2013.031413.00130>
3. Yu. A. Korchagin, V. P. Salomatov, and A. A. Chernov, *Radio Communication in Conductive Media*. Novosibirsk: Nauka, 1990. (In Russ.)
4. H. K. Sacks and R. L. Chufo, “Medium-frequency propagation in coal mines,” in *Proceedings of the Fourth WVU Conference on Coal Mine Electrotechnology*, 1978, pp. 1–12, url: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/works/cover-sheet225.html>.
5. D. V. Fedosov and R. A. Bekishev, “Multi-band connection device for inductive coupling,” RU Patent 191121 U1, Jul. 25, 2019. (In Russ.)
6. V. F. Dmitriyev and D. V. Shushpanov, “The main scientific problems of constructing domestic aggregated (complex) devices and distributed secondary power supply systems and the reasons for the lag of their characteristics from modern foreign analogues,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 7–11, 2018, url: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7011>. (In Russ.)
7. V. V. Chebyshev, *Antenna System Design Fundamentals*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2018. (In Russ.)
8. A. V. Kolesnikov, D. V. Fedosov, and A. V. Nikolaev, “Influence of climatic and geophysical factors on the characteristics of an underground wireless communication channel through rock,” *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*, no. 4, pp. 5–13, 2022, url: [http://radiotec.ru/ru/journal/Electromagnetic\\_Waves\\_and\\_Electronic\\_Systems/number/2022-4/article/22926](http://radiotec.ru/ru/journal/Electromagnetic_Waves_and_Electronic_Systems/number/2022-4/article/22926). (In Russ.)
9. H. H. Dobroski and L. G. Stolarczyk, “A whole-mine medium-frequency radio communication system,” in *Proceedings of the Sixth WVU Conference on Coal Mine Electrotechnology*, 1982, pp. 1–13, url: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/works/cover-sheet1525.html>.

10. R. L. Lagace, A. G. Emslie, and M. A. Grossman, *Modeling and Data Analysis of 50 to 5000 kHz Radio Wave Propagation in Coal Mines*. Cambridge: Arthur D. Little, Inc., 1980, url: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/works/coversheet179.html>.
11. D. V. Fedosov, “Mobile communication method and system for extended objects,” RU Patent 2642845 C1, Jan. 29, 2018. (In Russ.)
12. S. E. Lapin, A. G. Babenko, and D. V. Fedosov, “Communication system for underground structures,” RU Patent 2672273 C1, Nov. 13, 2018. (In Russ.)
13. V. I. Parfenov and V. D. Le, “Analysis of the influence of the environment on the efficiency of information processing algorithms in wireless sensor networks,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 49–54, 2020, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.2.49-54>. (In Russ.)

### Information about the Authors

**Dmitry V. Fedosov**, Candidate of Technical Sciences, general director of RPSLL «HF-Communication», Omsk, Russia.

*Research interests:* development of communication systems and antennas in earth materials.

*E-mail:* xferra@mail.ru

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-5904-2710>

**Andrey V. Kolesnikov**, engineer of RPSLL «HF-Communication», Omsk, Russia.

*Research interests:* antenna devices of various frequency ranges, theory and technology of radio lines in earth semiconducting materials.

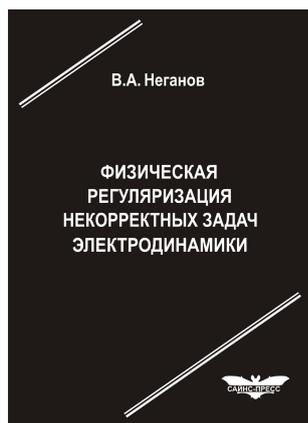
*E-mail:* kolesnikov.radio@yandex.ru

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-9048-2899>

#### РЕКЛАМА

**Неганов, В.А.**

**Физическая регуляризация некорректных задач электродинамики: линии передачи, антенны, дифракция электромагнитных волн / В.А. Неганов. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2008. – 432 с., 122 ил.**



ISBN 978-5-88070-161-2

УДК 537.87

ББК 32.84

Н 41

Изложены основы физической регуляризации некорректных задач электродинамики, связанной с особенностями физических и математических моделей задач (физические допущения, некорректные математические выкладки, отсутствие предельного перехода). Подход, по мнению автора, обладает большими возможностями, чем метод регуляризации Тихонова А.Н. интегральных уравнений Фредгольма первого рода, названный в книге методом математической регуляризации. Метод физической регуляризации (МФР) применен к анализу волноведущих и излучающих структур, а также задачам дифракции электромагнитных волн на некоторых телах. МФР позволил впервые корректно осуществить анализ полей в ближних зонах некоторых антенн, устранить несамосогласованное приближение Кирхгофа в задачах дифракции, установить связь поверхностной плотности тока проводимости с напряженностями электрического и магнитного полей для диполя Герца и т. п.

Для специалистов в области радиотехники и радиофизики СВЧ, электромагнитной совместимости РТС, математической теории дифракции и математического моделирования электродинамических структур самого широкого назначения. Может быть полезна преподавателям вузов, докторантам, аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.