

## ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 621.396.945, 621.396.25

### ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ ЧЕРЕЗ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

© 2023 г. Е. А. Кохонькова<sup>а</sup>, \*, Г. Я. Шайдуров<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Институт инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета,  
ул. Академика Киренского, 28, Красноярск, 660074 Российская Федерация

<sup>б</sup> Военно-инженерный институт Сибирского федерального университета,  
ул. Академгородок, 13а, Красноярск, 660036, Российская Федерация

\*E-mail: kokhonkova@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.04.2022 г.

После доработки 03.08.2022 г.

Принята к публикации 27.09.2022 г.

В качестве альтернативных беспроводных каналов повсеместного оповещения шахтеров рассмотрено использование электромагнитных волн инфранизких частот, 0.3...3 кГц и очень низких частот, 3...30 кГц. Исследована передача сигнала с помощью длинномерной заземленной антенны или петлевой магнитной антенны. Оценено влияние основных физических параметров горных пород на распространение и поглощение низкочастотного электромагнитного поля. Дан сравнительный анализ эффективности излучения с использованием магнитной рамки и длинномерной заземленной антенны в частотном диапазоне 0.5...30 кГц. Проведен анализ предельной глубины проникновения магнитного поля антенн через горные породы и зоны покрытия до глубины 1000 м. Приведены результаты экспериментов на руднике при передаче полезного сигнала с частотной и амплитудной манипуляцией.

DOI: 10.31857/S0033849423070057, EDN: WPEOXR

#### ВВЕДЕНИЕ

Существующие в настоящее время беспроводные системы связи в подземных горных выработках можно условно классифицировать как [1–6]:

– низкочастотные системы, использующие для передачи сигнала протяженные антенно-фидерные устройства;

– беспроводные системы высокочастотных (ВЧ) ( $f = 3...30$  МГц) и очень высокочастотных (ОВЧ) ( $f = 30...300$  МГц) диапазонов, дополненные проводными линиями связи в виде излучающего кабеля, проложенного вдоль горных выработок;

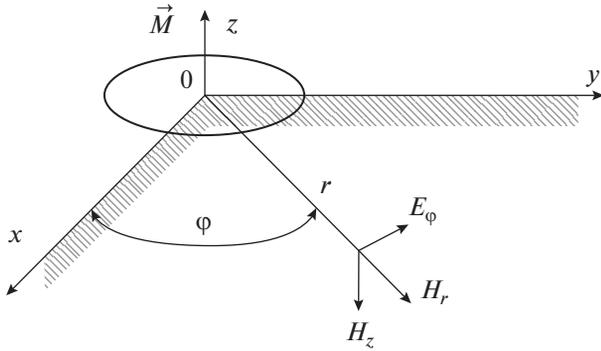
– системы ультра высокочастотных (УВЧ) диапазонов, предназначенные для связи с персоналом и контроля оборудования в точках доступа.

На горнодобывающих предприятиях также используются технологии коротковолновой связи, позволяющие осуществлять речевую связь на частотах 0.5...3 МГц. Однако такой канал функционирует лишь при наличии подземных “направляющих линий” в виде электрических кабелей, рельсов, а также штреков и ортов шахт, что неэффективно при работе в районах выработки руды.

В основных низкочастотных системах беспроводной передачи данных на рудниках используются компактные магнитные петли. Это формирует ста-

ционарные пункты беспроводной аварийной связи между выработками и поверхностью на расстоянии до 500 м при расположении пары приемопередатчиков на одной вертикальной оси. Альтернативой является использование длинномерной заземленной антенны, предназначенной для сигнализации и индивидуального вызова шахтеров. Это позволяет расширить зону покрытия коммуникационной сети шахты без значительных затрат на техническое обслуживание. При использовании таких систем остается актуальным вопрос оптимизации передающих антенн с учетом электрофизических параметров пород и руд, а также топологии самих выработок. Учет этих параметров на стадии проектирования системы позволит сделать прогноз по зоне покрытия при различных методах прокладки передающих антенн на поверхности шахтного поля или в выработках.

Среди опубликованных работ имеются теоретические оценки затухания электромагнитных (ЭМ) полей в более высокочастотных диапазонах, среднечастотном (СЧ), ВЧ и УВЧ, используемых для связи в тоннелях и горных выработках, где ослабление полей существенно ниже, чем при прохождении через сплошной горный массив. Здесь актуальны исследования по оптимизации



**Рис. 1.** Вертикальный магнитный диполь над проводящим полупространством:  $\vec{M}$  – магнитный момент;  $E_\varphi$ ,  $H_r$ ,  $H_z$  – компоненты электромагнитного поля;  $\varphi$  – угол отклонения от оси;  $r$  – расстояние до точки измерения.

положения базовых станций или излучающего кабеля в выработках. Для частот 3...30 кГц, в основном публикуются результаты практических работ на рудниках и шахтах [1–6]. К ним относятся индукционные каналы связи, использующие магнитные петли в качестве антенн. Большинство исследований, посвящённых распространению ЭМ-колебаний в горных породах, относятся к области электроразведки. Эта область является слишком специфичной, чтобы использовать ее для задач подземной связи [8, 9]. Для прогнозирования реальных каналов беспроводной связи под землей необходимы системные оценки передачи сигналов в зависимости от расстояния, электрофизических параметров среды и конструкции шахт, с учетом специфических помех на работающих объектах, чему и посвящены материалы данной работы.

Оценивается зависимость глубины передачи сигналов от физических параметров горных пород и типа используемых передающих антенн, в частности, длинномерной заземленной антенны и магнитной петли, определяется напряженность магнитного поля на предельной глубине 1000 м и дается сравнение с экспериментальными данными.

## 1. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основные физические свойства горного массива, оказывающие влияние на поглощение ЭМ-сигнала, определяются электропроводностью, диэлектрической и магнитной проницаемостью, зависящих от минерального состава и обводненности горных пород. Наибольшее влияние на ЭМ-поле в среде оказывает параметр удельного сопротивления  $\rho$  (Ом м) или электропроводности  $\sigma = 1/\rho$  (См/м). Для горных пород и рудных минералов характерно изменение этого параметра на

пять порядков ( $10^{-5}$ ... $10$  См/м). Основные типы горных массивов и поверхностных грунтовых слоев имеют усредненное значение электропроводности  $10^{-5}$ ... $5 \times 10^{-2}$  См/м. Водонасыщенные грунты и рудные тела, а также некоторые виды углей имеют показатель электропроводности  $5 \times 10^{-2}$ ... $5$  См/м [7].

Затухание напряженности ЭМ-поля в однородной среде определяется экспоненциальным законом. Показателем затухания является комплексное волновое число. Для сплошных сред оно определяется соотношениями [9]

$$k = \sqrt{i\sigma\mu\omega + \varepsilon\mu\omega^2} = k' + ik'', \quad (1)$$

$$k' = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{2} \left[ \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2 + 1} + 1 \right]}, \quad (2)$$

$$k'' = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{2} \left[ \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2 + 1} - 1 \right]}, \quad (3)$$

где  $k'$  – действительная часть волнового числа;  $k''$  – мнимая часть волнового числа;  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота;  $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$  – диэлектрическая проницаемость среды;  $\mu = \mu_0\mu_r$  – магнитная проницаемость среды;  $\sigma$  – электрическая проводимость среды.

Для наиболее распространенных значений электропроводности, увеличение этого параметра на один порядок приводит к увеличению поглощения в 2.5 раза (диапазон 0.5...30 кГц).

Теоретические оценки затухания ЭМ-полей в сплошных грунтовых средах обычно даются для однородных или двухслойных сред. Для этих моделей приводятся аналитические уравнения, учитывающие тип источника ЭМ-поля, в частности, магнитной петли или приземной горизонтальной антенны.

В задаче о возбуждении ЭМ-поля круговой петлей с током (рис. 1) в области антенны оно характеризуется на поверхности полупространства магнитным моментом [8]:

$$M = \pi a^2 J, \quad (4)$$

где  $a$  – радиус витка;  $J = J_0 \exp(-i\omega t)$  – сила тока петли.

Петля расположена на поверхности полупространства. Напряженность компонент поля оценивается как [8]:

$$H_r = \frac{M}{4\pi r^3} \times \left\{ -\frac{i\pi}{2} k^2 r^2 \left[ J_2\left(\frac{kr}{2}\right) H_2\left(\frac{kr}{2}\right) - J_1\left(\frac{kr}{2}\right) H_1\left(\frac{kr}{2}\right) \right] \right\}, \quad (5)$$

$$H_z(r, \varphi, 0) = \frac{M}{2\pi i \omega \mu_0 \sigma_1 r^5} \times \left[ 9 - \exp(ik_1 r) (9 - 9ik_1 r - 4k_1^2 r^2 + ik_1^3 r^3) \right] = \quad (6)$$

$$= \frac{9M}{i\omega \mu_0 \sigma_1 r^5} \exp(-kr),$$

$$E_\varphi = \frac{i\omega \mu I^M}{4\pi r^2} \times \left[ -\frac{2}{k^2 r^2} \left[ 3 - \exp(ikr) (3 - 3ikr - k^2 r^2) \right] \right], \quad (7)$$

где  $J_1, J_2, H_1, H_2$  – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода и первого и второго порядка от аргумента  $kr/2$ , описывающие изменение компонент поля в пространстве.

В ближней зоне излучателя для оценки вертикальной компоненты магнитного поля используется упрощенная формула [8]

$$H_z = \frac{M}{2\pi i \omega \mu_0 \sigma_1 r^5} \left( 9 - \left[ 1 + ik_1 r - \frac{(k_1 r)^2}{2} + o(k_1^2 r^2) \right] \times \left( 9 - 9ik_1 r - 4k_1^2 r^2 + ik_1^3 r^3 \right) \right) \approx \quad (8)$$

$$\approx (-M/4\pi r^3) \exp(-kr).$$

Альтернативным методом генерации ЭМ-поля является использование длинномерного заземленного электрического диполя. Конструктивно он представляет собой одну или две длинные кабельные линии, подключенные к источнику переменного тока, растянутые в противоположные стороны по поверхности земли и гальванически соединенные с заземленными электродами или контурами заземления. Поле длинной заземленной линии формируется под действием четырех составляющих [8]: протекающим в антенне током; гальваническими токами растекания между заземлениями; емкостными и индукционными токами, возбуждаемыми в грунте магнитным полем антенны.

Теория распространения токов и электромагнитных полей, используемая в данной работе, подробно рассмотрена в теории электроразведки полезных ископаемых. В работах [8, 9] эти соотношения проверены на практике. Сумма магнитных полей, создаваемых токами, протекающими в элементах проводника размером  $\Delta z$ , определяется выражением [9]:

$$\vec{H} = \vec{H}_0 + \sum_{i=1}^{K_1} \vec{H}_i + \sum_{i=K_1+1}^{K_2} \vec{H}_i, \quad (9)$$

где  $\vec{H}_0$  – поле, индуцированное током, протекающим в антенне  $\vec{J}$ .

Плотности токов растекания имеют три составляющие  $\vec{j}_x, \vec{j}_y, \vec{j}_z$ . Для двумерной задачи в плоскости  $XZ$  они описываются в виде [9]:

$$\vec{j}_x = \frac{\vec{J}}{2\pi} \times \left[ \frac{x}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} + \frac{(L-x)}{((L-x)^2 + y^2 + x^2)^{3/2}} \right], \quad (10)$$

$$\vec{j}_z = \frac{\vec{J}}{2\pi} \times \left[ \frac{z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} - \frac{z}{((L-x)^2 + y^2 + x^2)^{3/2}} \right], \quad (11)$$

где  $\vec{J}$  – ток в кабеле.

Амплитуда тока определяется поперечным сечением эквивалентного проводника, на которые разбита расчетная область. Плотность тока в этих проводниках можно оценить как [9]:

$$J_{ix,z} = j_{x,z} \frac{\pi d^2}{4}, \quad (12)$$

где  $d$  – диаметр поперечного сечения эквивалентного проводника.

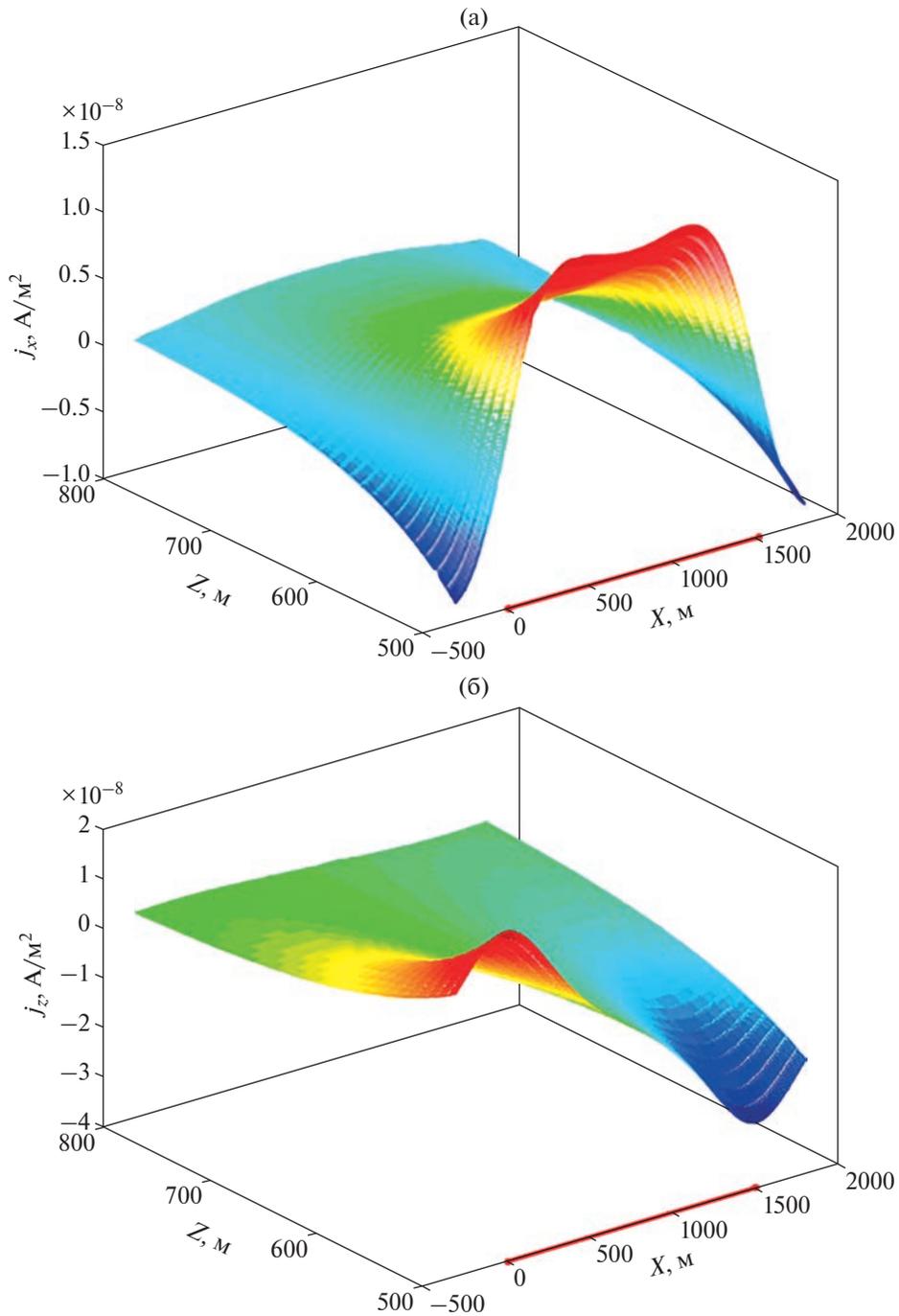
На рис. 2 приведена зависимость  $j_x$  и  $j_z$  от глубины и координаты  $X$  под антенной. Главным отличием изменения составляющих тока  $j_x$  и  $j_z$  является то, что компонента под центром кабеля  $j_z = 0$ . В этой точке направление тока изменяет свою ориентацию на противоположную.

Магнитное поле элемента тока определяется законом Био–Савара [9]:

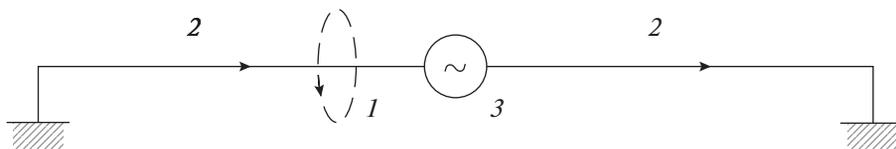
$$\vec{H}_i = \left( \frac{1}{2\pi} \int_{l_i} \frac{(\vec{J}_i dl_i \times \vec{l}_r)}{r_i^2} \right) \exp(-ik' r_i), \quad (13)$$

где  $dl_i$  – длина элемента тока  $\vec{J}_i$ ;  $\vec{l}_r$  – орт радиус-вектора  $r_i$ ;  $r_i$  – расстояние от элемента тока до точки  $M$ ;  $k'$  – коэффициент поглощения ЭМ-поля в горной породе на частоте  $f$ .

Поле наземного токового диполя определяется по следующему принципу. Передающая антенна в виде кабеля длиной  $dl$  подключена к источнику переменного тока, направленного по произвольному единичному вектору  $\vec{d}$ , ориентированному по оси  $X$ . Антенна питается переменным током  $J = J_0 \exp(-i\omega t)$ . Электрофизические параметры среды полупространства  $\sigma, \mu, \epsilon$  соответствуют усредненным свойствам горных пород. Необходимо оценить распределение компонент поля  $H$  в любой точке полупространства (рис. 3) [8].



**Рис. 2.** Распределение плотности тока в проводящем полупространстве на глубине 500...800 м для компонент  $j_x$  (а) и  $j_z$  (б).



**Рис. 3.** Продольный токовый диполь в однородной среде: 1 – вектор магнитного поля  $H$ ; 2 – вектор тока в проводнике  $J$ ; 3 – источник питания антенны.

Если дипольный источник направлен по оси  $x$ , с моментом  $p$ , то компоненты электромагнитного поля вычисляются через выражения [8]:

$$H_z(x, y, 0) = \frac{ip}{2\pi\omega\mu_0\sigma_1} \frac{1}{r^4} \frac{y}{r} \times \left\{ 3 - \exp(ik_1 r) (3 - 3ik_1 r - k_1^2 r^2) \right\} = \quad (14)$$

$$= \frac{3i p \sin(\theta)}{2\pi\omega\mu_0\sigma_1} \frac{1}{r^4} \exp(-k' r),$$

$$E_x(x, y, 0) = \frac{p}{2\pi\sigma_1 r^3} \left( 1 - 3 \frac{y^2}{r^2} + (1 - ik_1 r) \exp(ik_1' r) \right), \quad (15)$$

$$E_y(x, y, 0) = \frac{p}{2\pi\sigma_1} \frac{3}{r^3} \frac{x y}{r}, \quad (16)$$

где  $p = Jdl\vec{d}_x$  – дипольный момент токового диполя, ориентированного по оси  $x$ ;  $dl$  – длина диполя;  $\vec{d}_x$  – единичный вектор, указывающий на ориентацию по оси  $x$ ;  $J$  – сила тока;  $x, y$  – координаты;  $k_1$  – волновое число в среде.

В ближней зоне передающей антенны напряженность компоненты  $H_z$  можно определить по упрощенной формуле [8]:

$$H_z = \frac{ip \sin \theta}{2\pi\omega\mu_0\sigma_1} \frac{1}{r^4} \left( -\frac{1}{2} k_1^2 r^2 + o(k_1^2 r^2) \right) \approx \quad (17)$$

$$\approx \frac{p \sin \theta}{4\pi r^2} \exp(-k' r),$$

где  $\sin \theta = y/r$ .

Для более точных оценок распределения ЭМ-поля в горном массиве был проведен анализ с использованием математического моделирования методом конечных элементов. Для этого расчетная область разбивается на множество подобластей (треугольников или тетраэдров). В каждом элементе реализуется численное решение в виде комбинации базисных функций. Это позволяет получить пространственное распределение напряженностей компонент магнитного поля в поглощающей среде [10]:

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J}, \quad (18)$$

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}, \quad (19)$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}, \quad (20)$$

$$\text{div} \vec{J} = Q_{j,v}, \quad (21)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j}_e, \quad (22)$$

где  $Q_{j,v}$  – плотность объемного источника тока;  $\vec{j}_e$  – плотность электрического тока, внешнего источника (ток антенны);  $V$  – электрический потенциал;

$\sigma$  – электрическая проводимость;  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля;  $\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}$  – электрическая индукция;  $\partial \vec{D} / \partial t = \vec{J}_{\text{см}}$  – ток смещения;  $\sigma \vec{E} = \vec{J}_{\text{пр}}$  – ток проводимости;  $\vec{H}$  – напряженность магнитного поля;  $\vec{B}$  – магнитная индукция;  $\vec{A}$  – векторный потенциал.

Чтобы получить характеристики ЭМ-поля под землей, необходимо указать начальные и граничные условия на границах раздела сред и физических границах модели. В качестве начальных условий представлены частота, сила тока и параметры проводника в виде кабеля. Модель среды состоит из воздушного слоя высотой 200 м и слоя горного массива толщиной 1800 м при общих размерах  $2 \times 3 \times 5$  км. К внешним границам модели применяются граничные условия, которые можно выразить математически через нормальные составляющие:

$$\vec{n}_2 \times (\vec{A}_1 - \vec{A}_2) = 0, \quad (23)$$

$$\vec{n}_2 \times (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = 0,$$

где  $\vec{n}_2$  – нормаль, направленная наружу от второй среды;  $\vec{A}_1, \vec{A}_2$  – векторный потенциал в первой и второй среде от границы раздела;  $\vec{H}_1, \vec{H}_2$  – напряженность магнитного поля в первой и второй среде от границы раздела.

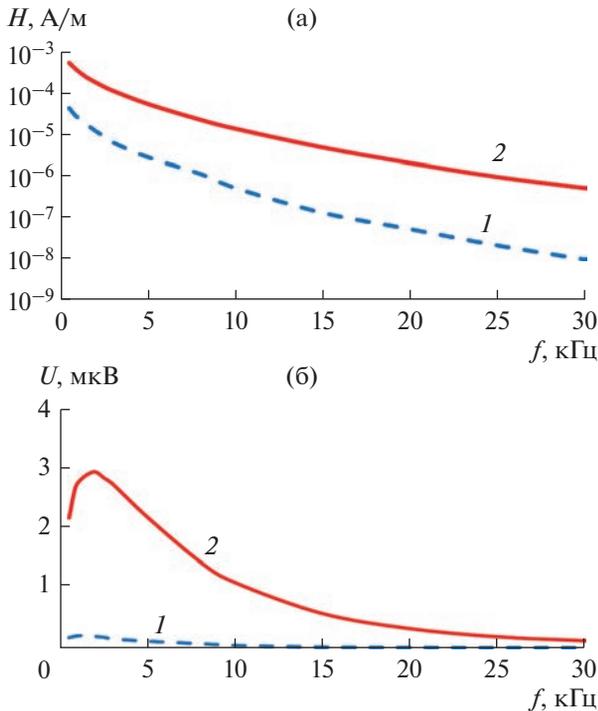
Векторный потенциал определяется волновым уравнением, с временной калибровкой  $\vec{E} = -\partial \vec{A} / \partial t$  и подстановкой  $\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$  в (10), (22) [14]:

$$\text{rot} (\mu^{-1} (\text{rot} \vec{A})) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \epsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = 0. \quad (24)$$

Применение математического моделирования (метод конечных элементов) дает численное решение систем дифференциальных уравнений. В данном случае используется итерационный обобщенный метод минимальных невязок (GMRES) [11, 12]. Его использование позволяет учитывать границы раздела сред сложной формы, такие как рудные тела, водные пласты и слои горных пород.

## 2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данном разделе приведен сравнительный анализ глубины проникновения ЭМ-поля в сплошную среду с характерными физическими свойствами горного массива с использованием антенны в виде магнитной петли и заземленной длиномерной антенны. Анализ проведен как при решении уравнений (1), (8), (9)–(13), (17), так и при помощи моделирования методом конечных элементов (18)–(24). Расчетные оценки были сделаны для моделей со следующими параметрами: длина кабеля  $l = 1400$  м; радиус магнитной петли



**Рис. 4.** Расчетные графики зависимости напряженности магнитного поля (а) и напряжения на входе приемника (б) от частоты для разных конфигураций излучающей антенны на глубине  $Z = 1000$  м: 1 – магнитная петля; 2 – заземленная длинномерная антенна.

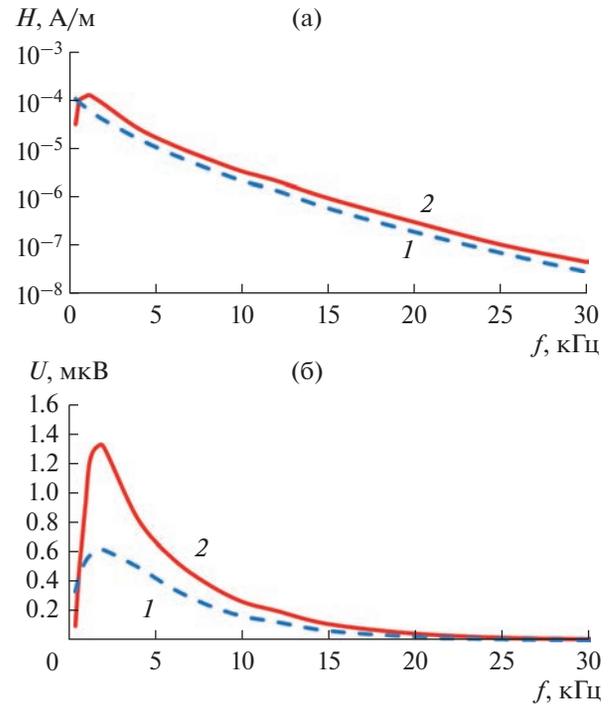
$R = 222$  м; число витков петли  $n = 1$ ; сила тока антенны  $J = 5$  А; частота ЭМ-поля  $f = 0.5 \dots 30$  кГц; удельная электрическая проводимость среды  $\sigma = 10^{-3}$  См/м; диэлектрическая проницаемость среды  $\epsilon_r = 10$ ; магнитная проницаемость среды  $\mu_r = 1$ .

Для регистрации поля используется компактная магнитная антенна с ферритовым сердечником эффективной площадью  $1 \text{ м}^2$ . Наведенное на антенне напряжение рассчитывается через выражение [13]

$$U = \omega \mu_0 H S_{\text{эф}}, \quad (25)$$

где  $S_{\text{эф}} = \mu_{\text{сер}} S_{\text{сер}} n_{\text{пр}} = 1 \text{ м}^2$  – эффективная площадь приемной индуктивной антенны;  $\mu_{\text{сер}} = 800$  – магнитная проницаемость сердечника;  $S_{\text{сер}} = 1.25 \times 10^{-7} \text{ м}^2$  – площадь поперечного сечения ферритового сердечника;  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $n_{\text{пр}} = 4000$  – число витков приемной антенны.

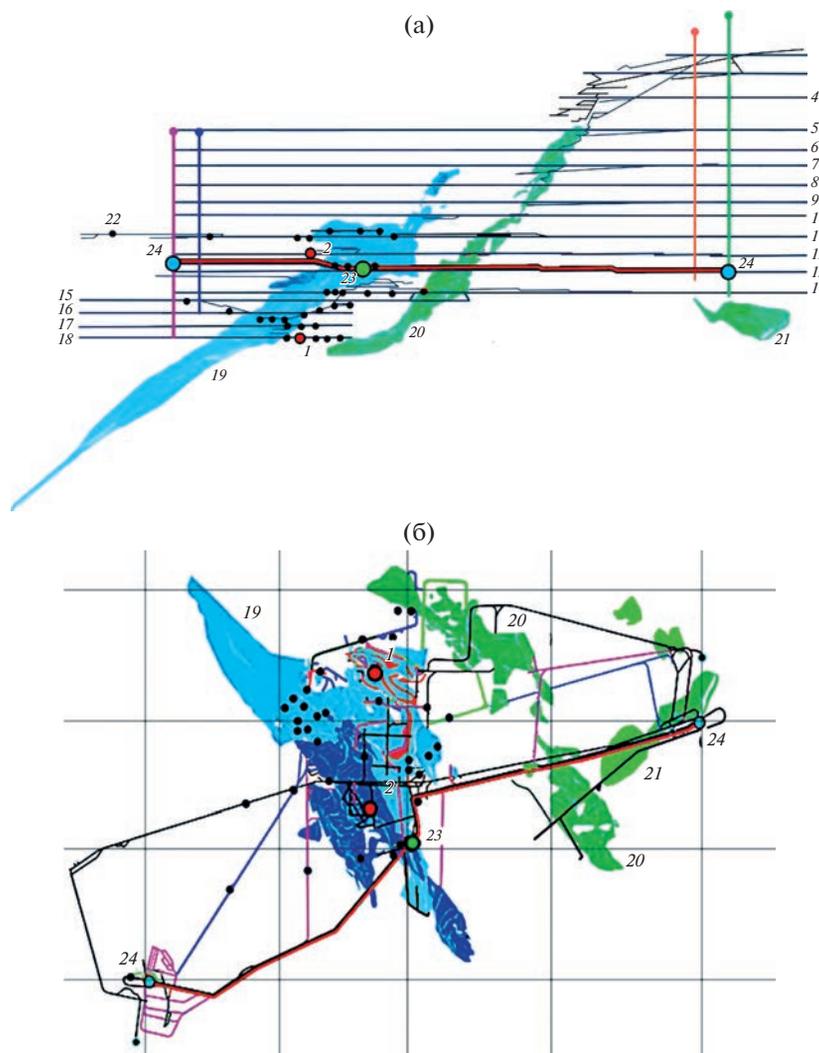
В результате расчетов и моделирования были получены оценки магнитного поля и наведенного в приемной антенне сигнала на предельной глубине 1000 м. Для магнитной петли расчет показал амплитуду сигнала 0.2 мкВ на частоте 1.5 кГц (рис. 4б). При этом моделирование дало наиболь-



**Рис. 5.** Графики зависимости напряженности магнитного поля (а) и напряжения на входе приемника (б) от частоты для разных конфигураций излучающей антенны на глубине  $Z = 1000$  м, полученные методом конечных элементов: 1 – магнитная петля; 2 – заземленная длинномерная антенна.

ший уровень сигнала 0.62 мкВ на частоте 2 кГц (рис. 5б). Для заземленного кабеля расчетный уровень сигнала составлял величину 2.9 мкВ на частоте 2 кГц (рис. 4б), а моделирование на этой частоте дало 1.32 мкВ (рис. 5б). При анализе методом конечных элементов, помимо расчета распределения ЭМ-полей в среде, учитывались вторичные явления, такие как наличие токов проводимости в горных породах, токов растекания и индуцированного ими ЭМ-поля.

Экспериментальные данные, отражающие эффективность распространения низкочастотных ЭМ-полей через горные породы были получены на руднике по добыче руд цветных металлов. Руды представлены в основном халькопиритом [14]. Рудник включает в себя 18 горизонтов с предельной глубиной 870 м и расположен в области нескольких обширных рудных тел с большим углом падения  $35^\circ \dots 40^\circ$ . Месторождение включает в себя три крупные залежи, содержащие медно-цинковые, свинцово-цинковые, медно-колчеданные руды, большинство из которых обладают низким удельным сопротивлением ( $\rho = 30 \dots 80$  Ом м), что увеличивает их поглощающие и экранирующие свойства. Передатчик и антенны были установлены на горизонте 13. В области центра залежи установлен передатчик (рис. 6, точка 23). Две из-



**Рис. 6.** Схема рудника с установкой передатчика и передающей антенны; а – вид сбоку; б – вид сверху; 1, 2 – контрольные точки измерения; 4–18 – номера шахтных горизонтов; 19 – залежь “Родниковая”; 20 – залежь “Малеевская”; 21 – залежь “Октябрьская”; 22 – точки измерения; 23 – точка установки передатчика; 24 – точки заземления антенны; 25 – передающая антенна.

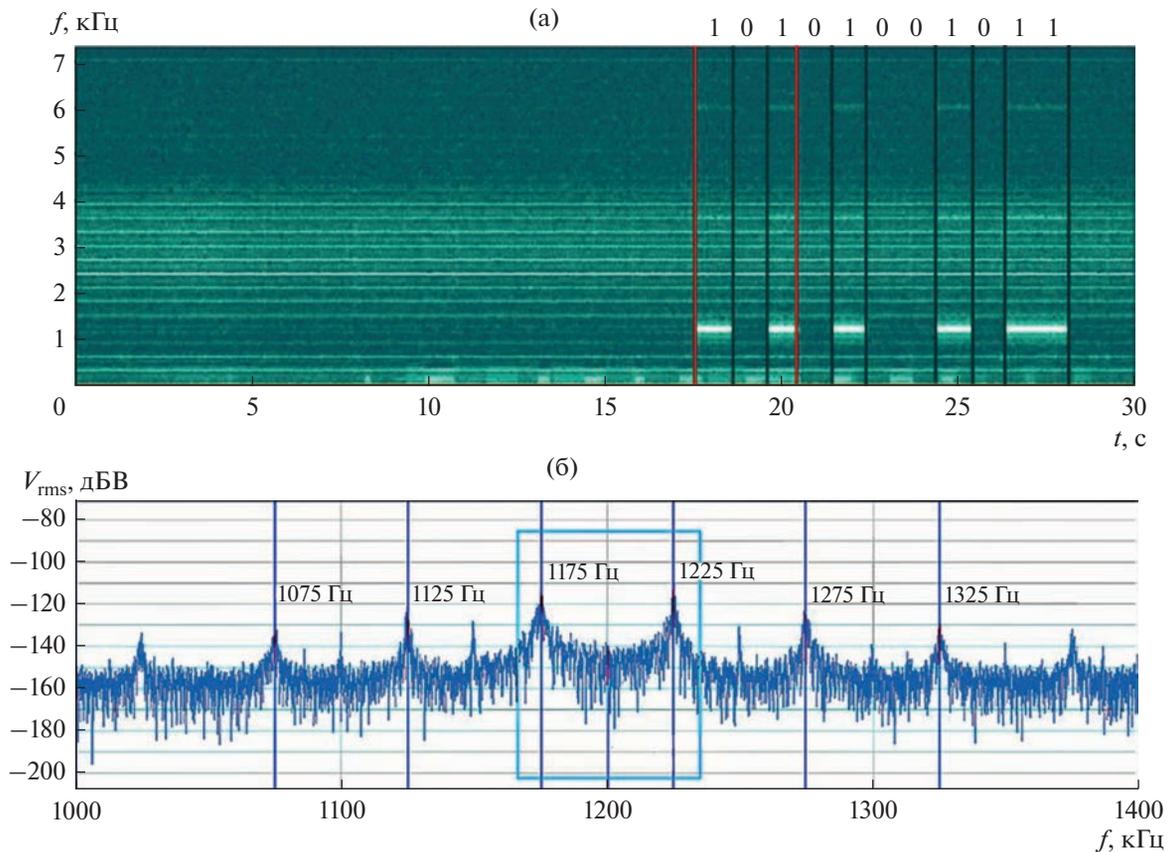
лучающие антенны длиной 1300 м были растянуты по горным выработкам к шахтным стволам рудника, расположенным в западной и восточной части горизонта (рис. 6, точка 24). Параметры передатчика указаны в табл. 1.

Регистрация сигнала проводилась с использованием приемной магнитной антенны, подключенной к аналого-цифровому преобразователю (LTR-CEU-1-4). В горных выработках преобладали промышленные помехи, сосредоточенные в области линий электроснабжения шахты. В областях выработки руды преобладали гауссовские помехи. Уровень помех в шахте варьировался в пределах от –140 до –160 дБВ (рис. 7). Были проведены измерения на предельном расстоянии от антенны, 450...500 м в области горизонта 18 (точка 1). Приемник располагался под рудным телом,

частично экранирующим приемную антенну от передающей. При записи сигнала в области линий электроснабжения в спектре наблюдались

**Таблица 1.** Технические параметры передатчика

Параметр	Значение
$P$ , кВт	3
$J_0$ , А	5
Тип манипуляции	ЧМн, АМн
$f$ , Гц	$f_1 = 966, f_2 = 984$ для ЧМн, $f_0 = 1200$ для АМн
$l$ , м	1300
$S_{эф}$ , м <sup>2</sup>	1



**Рис. 7.** Характеристика сигнала с амплитудной манипуляцией: а – спектрограмма; б – спектральная характеристика сигнала и помех в диапазоне 1000...1400 Гц.

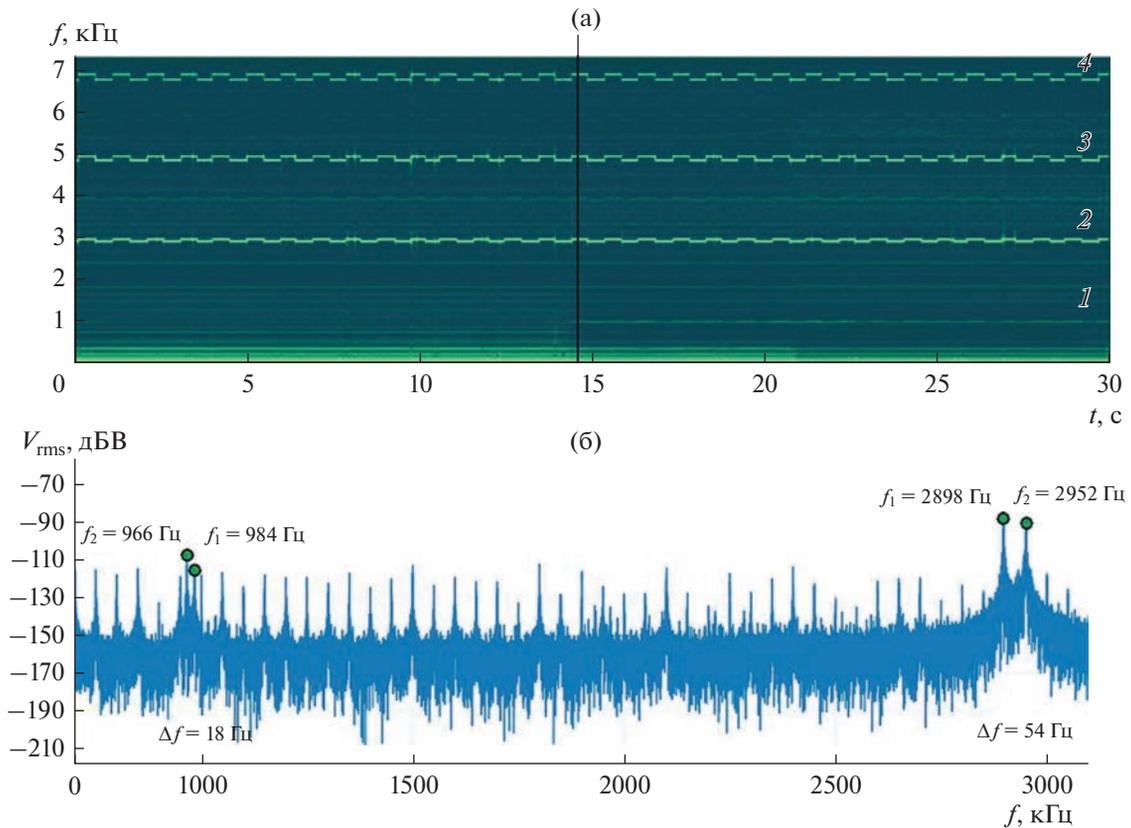
промышленные помехи, кратные частоте 50 Гц в диапазоне до 4 кГц. Производилась передача битовой последовательности (10101001011) с амплитудной манипуляцией (АМн) и подавлением несущей. В полосе  $\Delta f = 25$  Гц боковые частоты соответствовали  $f_0 + f_1 = 1225$  Гц и  $f_0 - f_1 = 1175$  Гц. Присутствие в спектре мощный промышленных помех требовало реализации специальных алгоритмов их компенсации. Уровень сигнала составляет  $-110$  дБВ при уровне шумов  $-140$  дБВ. Это позволило осуществить беспроводную передачу полезного сигнала через горный массив с низкоомными включениями.

Была реализована передача сигнала с частотной манипуляцией (ЧМн) сигнала на частотах  $f_1 = 966$  Гц,  $f_2 = 984$  Гц при расположении приемника в области экранирующих рудных залежей на горизонте 12 (точка 2, расстояние от антенны 100 м). Уровень полезного сигнала на рабочих частотах составлял  $-108$  дБВ на частоте 966 Гц и  $-115$  дБВ на частоте 984 Гц с уровнем шума  $-140$  дБВ. Третья, пятая и седьмая гармоники имели более высокий уровень отношения сигнал/шум. Так, выигрыш по третьей гармонике по сравнению с первой со-

ставлял 20 дБВ. Вероятно, это вызвано наличием в тоннеле проводящих коммуникаций в виде металлоконструкций, проводов и др. (рис. 8). Низкий уровень сигнала обусловлен положением приемника внутри рудного тела с сильными поглощающими свойствами.

На основе геологических данных месторождения “Малеевское” (Вост. Казахстан) была проведена проверка расчетных данных с использованием вычислительного моделирования с аналогичным эксперименту положению передающих антенн и рудных залежей. Определен уровень сигнала в контрольных точках 1 и 2. Указанный ранее горный массив имеет усредненные электрофизические показатели для пород горного Алтая ( $\sigma = 10^{-3}$  См/м,  $\epsilon = 10$ ,  $\mu = 1$ ). Свойства рудных залежей определяется содержанием рудного минерала в цементующей породе в виде вкраплений с содержанием халькопирита 1.5...7% ( $\sigma = 8 \times 10^{-2}$  См/м,  $\epsilon = 15$ ,  $\mu = 1$ ). Модель была приближена к реальной геометрии рудных тел, топологии передающих антенн и положения передатчика (см. табл. 1) [14].

Результаты численного решения приведены на рис. 9, контрольные точки 1, 2 соответствуют поло-



**Рис. 8.** Характеристика сигнала с частотной манипуляцией в точке 12: а – осциллограмма; б – спектрограмма; б – спектральная характеристика; 1 – полезный сигнал; 2 – третья гармоника; 3 – пятая гармоника; 4 – седьмая гармоника.

жению приемника на горизонтах 18 и 12. В контрольных точках расчетный уровень сигнала равен  $-109.8$  дБВ в точке 1 при  $f = 1200$  Гц и  $-112$  дБВ в точке 2 при  $f = 980$  Гц. Моделирование дало высокий уровень сходимости с экспериментальными данными. Наблюдалось большое затухание ЭМ-поля в районе рудных залежей и водных пластов. Зона покрытия по пределу чувствительности  $-120$  дБВ достигает 1 км от антенны в области вмещающей породы (рис. 9а, 9б) и сокращается до 700 м в области массивной залежи (см. рис. 9б).

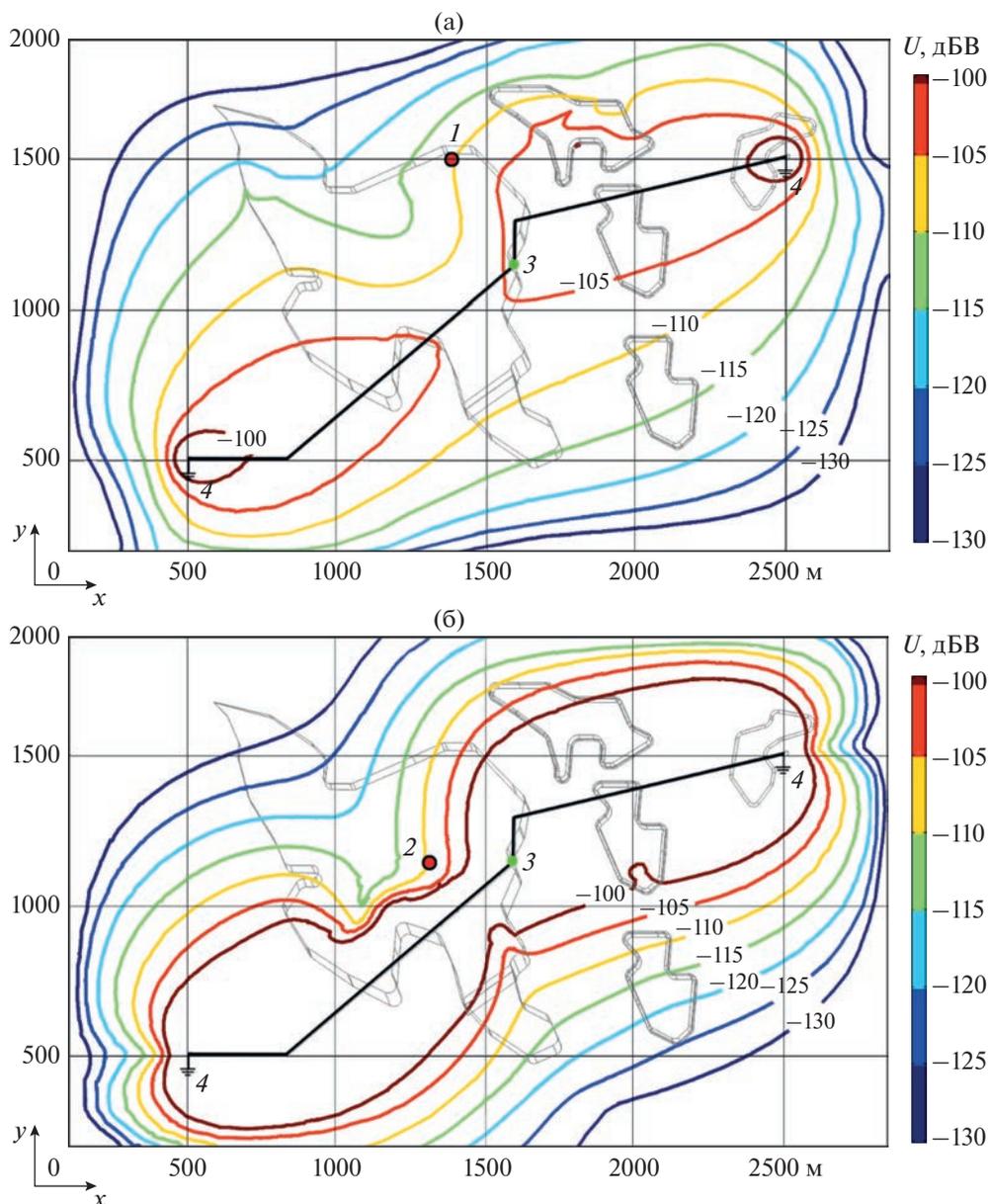
### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительные расчетные оценки, результаты моделирования и экспериментальные данные указывают на большую эффективность применения заземленного длинного кабеля в качестве передающей антенны по сравнению с магнитной петлевой антенной. С увеличением требуемой глубины прохождения электромагнитных полей через горные породы и повышении электропроводности среды необходимо снижать рабочие частоты до 1...6 кГц. Массивные рудные залежи оказывают большое влияние на величину электромагнитного поля антенны на малом расстоянии (до 500 м). Так, на расстоянии 100 м от пере-

дающей антенны уровень сигнала внутри рудного тела составлял  $-110$  дБВ при уровне шума  $-140$  дБВ. Аналогичный уровень сигнала и шума (от  $-108$  до  $-115$  дБВ) был зарегистрирован на расстоянии 450...500 м от антенны в области, где не наблюдалось экранирование излучающей антенны рудным телом. Линии электроснабжения в горных выработках вносят мощные промышленные помехи на частотах, кратных 50 Гц, что требует реализации оптимальных методов их подавления. Наличие длиномерной металлической инфраструктуры в виде кабельных линий, труб, балок позволяют поднимать уровень сигнала в области выработок при наличии экранирующих рудных тел.

Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных показывает хорошую сходимость по определению зоны покрытия передающего комплекта. Это позволяет использовать расчетные прогнозы на ранней стадии проектирования систем беспроводной сигнализации и индивидуального вызова персонала с учетом известных геологических и гидрогеологических данных, а также геометрии шахты и рудных залежей.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



**Рис. 9.** Графики распределения уровня сигнала на уровнях горизонта 18 при частоте 1200 Гц (а) и горизонта 12 при частоте 980 Гц (б), вид сверху: 1, 2 – контрольные точки измерения; 3 – передатчик; 4 – точки заземления антенн и шахтные столбы.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-07-00267).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kamruzzaman S.M., Fernando X., Jaseemuddin M., Farjow W. // Smart Technologies for Emergency Response and Disaster Management. 2017. № 1. P. 42. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-2575-2.ch002>
2. Farjow W., Raahemifar K., Fernando X. // Appl. Mathem. Modelling. 2015. V. 19. № 39. P. 5997. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.01.043>
3. Lin S.-C., Alshehri A.A., Wang P., Akyildiz I.F. // IEEE Internet of Things J. 2017. V. 4. № 5. P. 1454. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2729887>
4. Akyildiz I.F., Wang P., Sun Z. // IEEE Commun. Magazine. 2015. V. 53. № 11. P. 42. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7321970>
5. Ralchenko M., Roper M., Svilans M., Samson C. // IEEE Trans. 2017. V. AP-65. № 6. P. 3146. <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2694758>

6. *Ralchenko M., Roper M., Samson C., Svilans M.* // Technical Program and Expanded Abstr. Soc. Exploration Geophysicists (SEG) Int. Exposition and 86th Annual Meet. Dallas. 18–21 Oct. 2016. Houston: SEG, 2016. P. 2154.  
<https://doi.org/10.1190/segam2016-13688479.1>
7. *Пархоменко Э.И.* Электрические свойства горных пород. М.: Наука, 1965.
8. *Иголкин В.И., Шайдуров Г.Я., Тронин О.А., Хохлов М.Ф.* Методы и аппаратура электроразведки на переменном токе. Красноярск: СФУ, 2016.
9. *Жданов М.С.* Геофизическая электромагнитная теория и методы. М.: Научный мир, 2012.
10. *Григорьев А.Д.* Методы вычислительной электродинамики. М.: Физматлит, 2012.
11. *Matinfara M., Zareamoghaddamb H., Eslamia M., Saeidy M.* // Computers and Mathematics with Applications. 2012. № 63. № 1. P. 1.  
<https://doi.org/10.1016/j.camwa.2011.09.022>
12. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. М.: Гардарики, 2003.
13. *Хомич В.И.* Приемные ферритовые антенны. М.-Л.: Энергоиздат, 1963.
14. *Юдовская М.А.* Минералого-геохимические особенности и условия формирования руд Малеевского месторождения на Рудном Алтае. Дис. канд. геолого-минералог. наук. М.: МГУ, 1995. 220 с.