

EDN: VJXXIR

УДК 621.396.945, 621.396.99

## Investigation of the Reverse Channel of Information Transmission “Charge-Wellhead” During Drilling and Blasting

Vyacheslav V. Radaev<sup>a</sup>, Vyacheslav V. Romanov<sup>b</sup>,  
Danil S. Kudinov<sup>\*b</sup> and Ekaterina A. Kohonkova<sup>b</sup>

*<sup>a</sup>JSC Central Design Bureau “Geofizika”*

*Krasnoyarsk, Russian Federation*

*<sup>b</sup>Siberian Federal University*

*Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 26.10.2022, received in revised form 10.11.2022, accepted 19.12.2022

**Abstract.** The article describes a method for organizing a wireless communication channel between a charge activation device located in a ground well at a depth of 25 m and a seismic station on the surface. The channel from the well to the ground surface will allow transmitting service data and response commands to the activation signal to the receiving path of the seismic station to eliminate lost charges and confirm the activation of working charges. It is necessary to develop a method and determine the operating frequencies of the channel in soil conditions (dry and watered), taking into account the limitation of the transmitter and antenna by the linear dimensions of the well (diameter no more than 80 mm). The design of the actuating device, as well as the receiving/transmitting antenna, is described, measurements of the magnetic field strength at a distance from it at frequencies of 20–100 kHz. The measurement results were used to estimate the strength of the vertical component of the magnetic field in absorbing media with electrical properties of soils.

**Keywords:** wireless channel, ground well, explosive seismic survey, very low frequencies, low frequencies, magnetic field, loop antenna.

**Acknowledgment.** The research was carried out with the financial support of the RFBR, the Government of the Krasnoyarsk Territory, the Regional Science Foundation and Radio Engineering Systems LLC within the framework of scientific project No. 21–47–242901 “Research of radio signal propagation in layered heterogeneous geological environments and development of data transmission hardware for the implementation of a wireless detonation system of charges in seismic wells”.



## Исследование обратного канала передачи информации «заряд-устье скважины» при буровзрывных работах

**В. В. Радаев<sup>а</sup>, В. В. Романов<sup>б</sup>,  
Д. С. Кудинов<sup>б</sup>, Е. А. Кохонькова<sup>б</sup>**

*<sup>а</sup>АО «ЦКБ «Геофизика»*

*Российская Федерация, Красноярск*

*<sup>б</sup>Сибирский федеральный университет*

*Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** В статье описан метод организации беспроводного канала связи между устройством активации заряда, расположенного в грунтовой скважине на глубине до 25 м, и сейсмостанцией на поверхности. Канал из скважины на поверхность грунта позволит передавать служебные данные и команды отклика на сигнал активации на приемный тракт сейсмостанции для исключения утеранных зарядов и подтверждения активации рабочих зарядов. Необходима разработка метода и определение рабочих частот канала в условиях грунтов (сухих и обводненных) с учетом ограничения передатчика и антенны линейными размерами скважины (диаметр не более 80 мм). Описана конструкция исполнительного устройства, а также приемной/передающей антенны, проведены измерения напряженности магнитного поля при удалении от нее на частотах 20–100 кГц. Результаты измерений были использованы для оценки напряженности вертикальной компоненты магнитного поля в поглощающих средах с электрофизическими свойствами грунтов.

**Ключевые слова:** беспроводной канал, грунтовая скважина, взрывная сейсморазведка, очень низкие частоты, низкие частоты, магнитное поле, рамочная антенна.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Краевого фонда науки и ООО «Радиотехнические системы» в рамках научного проекта № 21–47–242901 «Исследование распространения радиосигналов в слоисто-неоднородных геологических средах и разработка аппаратных средств передачи данных для реализации системы беспроводной детонации зарядов в сейсморазведочных скважинах».

Цитирование: Радаев В. В. Исследование обратного канала передачи информации «заряд-устье скважины» при буровзрывных работах / В. В. Радаев, В. В. Романов, Д. С. Кудинов, Е. А. Кохонькова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(1). С. 36–47. EDN: VJXXIR

### Введение

Наиболее распространенными в области беспроводной активации заряда для целей добычи минеральных ресурсов, а также для СРР являются проводные методы связи со скважинным детонатором. Посредством проводного канала осуществляется обмен служебными данными и активация зарядов при помощи взрывной машины или сейсмостанции. Модификацией обратного канала из грунтовой скважины служит замена проводных каналов от множества скважинных устройств активации на радиоканал, который организован портативным передатчиком

и антенной, выведенных из устья скважины на поверхность через проводную линию [1–3]. Это позволяет управлять обширными группами детонаторов в зоне прямой видимости. Данные устройства подвергаются воздействию движущихся грунтов под действием грунтовых вод, что может привести к обрыву кабеля, соединенного с портативным передатчиком.

Оснащение скважинных детонаторов беспроводным каналом непосредственно из скважины в основном применяется при добыче минерального сырья в карьерах и рудниках [4, 5]. Этот тип систем использует магнитные антенны, включенные в устройства активации в качестве индивидуального канала или подземных ретрансляторов для группы зарядов. Беспроводные каналы для систем удаленной активации работают на частотах 1–8 кГц для обеспечения максимальной проникающей способности через горные породы и грунты [6–8]. Все представленные полностью беспроводные технологии предназначены для добычи минералов и строительства тоннелей. Ключевым фактором для использования беспроводных систем в области сейсморазведки является работа всех устройств (сейсмостанция, взрывная машина, группа детонаторов) в единой системе времени. Отклонение по времени между узлами системы для целей сейсморазведки не должно превышать 200 мкс от настроенного на сейсмостанции, это необходимо для точной регистрации времени активации заряда и регистрации отраженных упругих волн от слоев горных пород. Обратный канал требуется для подтверждения активации заряда по установленной метке времени и обмена данными.

Техническая реализация обратного канала ограничена размерами грунтовой скважины с диаметром не более 80 мм и глубиной до 25 м, электрофизическими свойствами грунтов (электропроводность  $\sigma=1\text{E-}3\text{--}1\text{E-}1$  См/м) и зарядом источника питания, что не позволяет использовать высокую мощность. Необходимо сформировать конструкцию компактного приемопередатчика, который подключается к устройству активации заряда, и определить напряженность поля в воздухе и поглощающих средах. Это позволит оценить возможность организации беспроводного канала в условиях различных грунтов.

### Техническая реализация

Исполнительное устройство предназначено для приема сигналов синхронизации и управления от устройства управления взрывной машины, выполнения заданного алгоритма работы и активации взрывателя, излучения несущей частоты для оценки определения положения исполнительного устройства в скважине (глубины).

В состав исполнительного устройства входит: источник питания (ИП), источник вторичного питания (ИВП), модуль приемника (МПРМ), модуль передатчика (МПРД), блок управления (БУ), высокостабильный задающий генератор (ЗГ), ПРМ/ПРД магнитная антенна, источник питания, взрыватель (рис. 1).

Блок управления представляет собой устройство на базе микропроцессора, в его функции входит управление модулями, входящими в состав ИУ в соответствии с режимами работы, определяемыми алгоритмом использования УУ в соответствующих режимах. Высокостабильный задающий генератор (ЗГ) с использованием термокомпенсированного опорного генератора (МПРМ) представляет собой радиоприемное устройство прямого преобразования – цифровое радиоприемное устройство. Построение МПРМ может быть выполнено по классической схеме цифрового приемника. МПРД – предназначен для передачи сигналов управления и син-

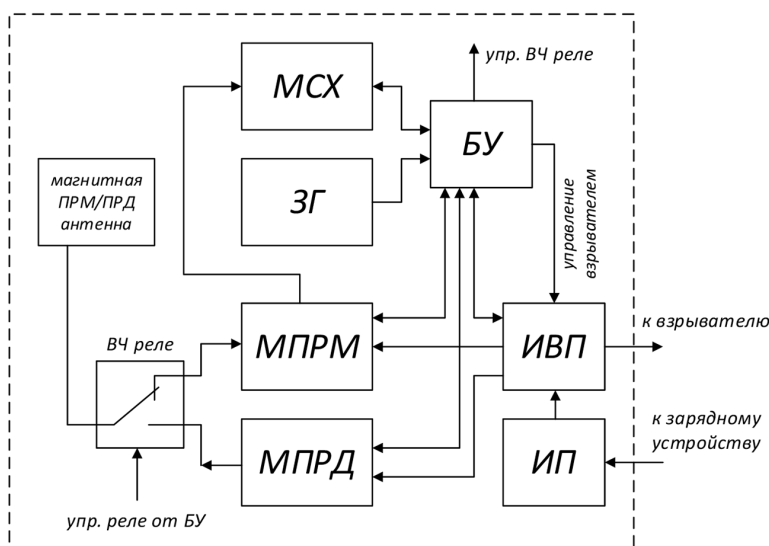


Рис. 1. Структурная схема исполнительного устройства

Fig. 1. Block diagram of the actuator

хронизации на исполнительное устройство. МПРМ непосредственно управляется от БУ через оптронные ключи, далее через драйверы идет возбуждение мостового (полумостового) ключевого усилителя мощности. ВЧ реле предназначено для переключения режимов работы ИУ – на прием или на передачу.

### Техническая реализация канала управления

Магнитная приемная/передающая антенна представляет собой малогабаритную ферритовую антенну, предназначенную в основном для приема сигналов синхронизации и управления от взрывной машины, а также, в режиме определения глубины заряда, для кратковременной работы на передачу немодулированного гармонического сигнала и отправки ответных сигналов на команду активации. Структурная схема магнитной антенны приведена на рис. 2. На ферритовый стержень намотаны приемная магнитная антенна из  $N$  витков и передающая антенна в виде водного витка, соединенного с передатчиком через трансформатор на основе ферритового кольца для повышения силы тока в витке.

Измерения напряженности поля проводились в лаборатории при расстоянии между источником поля (передающая (ПРД) магнитная антенна) и приемной антенной (приемная рамочная – магнитная антенна): 2, 3, 4, 5 и 6 м. Передающая ферритовая (магнитная) антенна представляет собой малогабаритную ферритовую антенну. Измерение будет проведено в диапазоне 20–100 кГц.

Макет магнитной антенны имеет габариты ( $в \times ш \times г$ )  $58 \times 58 \times 35$  мм. В перспективе конструкция антенны может быть уменьшена с целью размещения в исполнительном устройстве детонатора диаметром до 60 мм, без ухудшения электрических характеристик.

На рис. 3 приведено фото макета магнитной антенны по схеме на рис. 2. Размеры ферритового сердечника, состоящего из четырех склеенных элементов (брусков феррита с прямоуголь-

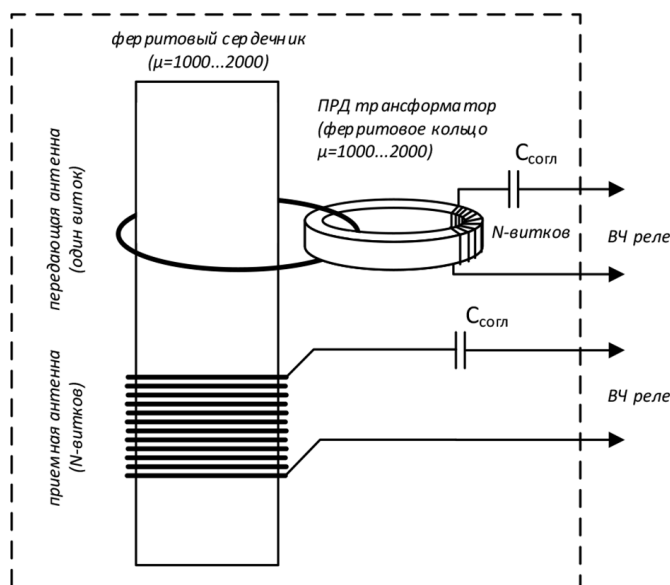


Рис. 2. Структурная схема магнитной приемной/передающей антенны

Fig. 2. Block diagram of a magnetic receiving/transmitting antenna

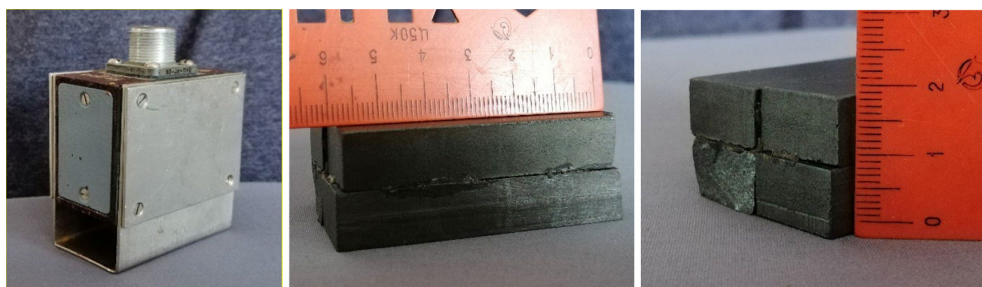


Рис. 3. Фото макета магнитной передающей антенны и ферритового сердечника, состоящего из четырех склеенных элементов (брусков)

Fig. 3. Photo of a layout of a magnetic transmitting antenna and a ferrite core consisting of four glued elements (bars)

ным сечением), устанавливаемого в нижнюю часть,  $20 \times 58 \times 32$  мм. Ферритовый сердечник антенны имеет относительную магнитную проницаемость  $\mu_r=2500$ . Количество витков первичной обмотки трансформатора  $N=80$ , ферритовое кольцо имеет относительную магнитную проницаемость  $\mu_r=1000$ .

Входное сопротивление для генератора, подключенного к передающей антенне в рабочем диапазоне частот, приведено в табл. 1.

В качестве усилителя мощности использовался генератор ГЗ–112, обеспечивающий выходной ток от 50 до 200 мА в зависимости от входного сопротивления ферритовой антенны. В качестве частот измерения использовались 20–100 кГц.

В качестве измерителя напряженности поля использовался селективный микровольтметр и прибор для измерения радиопомех типа SMV 11 (входное сопротивление 50 Ом) с приемной

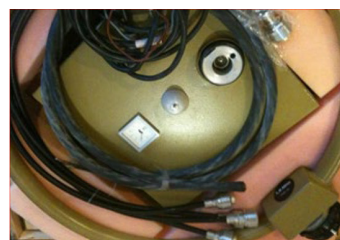
Таблица 1. Входное сопротивление для генератора на входе ферритовой антенны

Table 1. Input impedance for a generator at the input of a ferrite antenna

f, кГц	Z, Ом	f, кГц	Z, Ом
20	19,3	70	65,8
30	28,7	80	75,0
40	38,0	90	84,2
50	47,3	100	93,5
60	56,6		



а



б

Рис. 4. Измерительные устройства: а – селективный микровольтметр типа SMV 11; б – приемная рамочная антенна типа FMA 11

Fig. 4. Measuring devices: а – selective microvoltmeter type SMV 11; б – receiving frame antenna type FMA 11

рамочной антенной типа FMA 11. Антенна для измерения напряженности поля типа FMA 11, предназначена для измерения в диапазоне частот от 0,01 до 30 МГц. Диаметр рамочной антенны 600 мм. Рамочная антенна и милливольтметр имеют метрологическую поверку. Для рамочной антенны определены корректирующие коэффициенты антенны, что позволяет выполнить расчет напряженности поля в точке измерения.

Краткий – электрический принцип работы: в рамочной антенне под влиянием магнитной составляющей поля индуцируется напряжение, которое измеряется селективным микровольтметром. Фото селективного микровольтметра типа SMV 11 и приемной рамочной антенны типа FMA 11 приведены на рис. 4.

Расчетное значение напряженности поля, эквивалентное напряженности электрического поля плоской волны:

$$E_{Z_{\text{эке}}}[\text{дБ}(\text{мкВ}/\text{м})]=U[\text{дБ}(\text{мкВ})]+K[\text{дБ}(1/\text{м})], \quad (1)$$

где  $U$  – напряжение, измеренное селективным микровольтметром [дБ(мкВ)];  $K$  – коэффициент коррекции для измерительной антенны, известные табличные значения [дБ(1/м)].

Погрешность измерения напряженности поля антенны FMA 11 вместе с селективным микровольтметром SMV 11 оценивается величиной  $\pm 2,5$  дБ.

Практически для удобства использования всегда определяют напряженность электрического поля. Исходя из этих соображений выполняется калибровка приемных измерительных антенн, используемых для определения напряженности поля плоской волны.

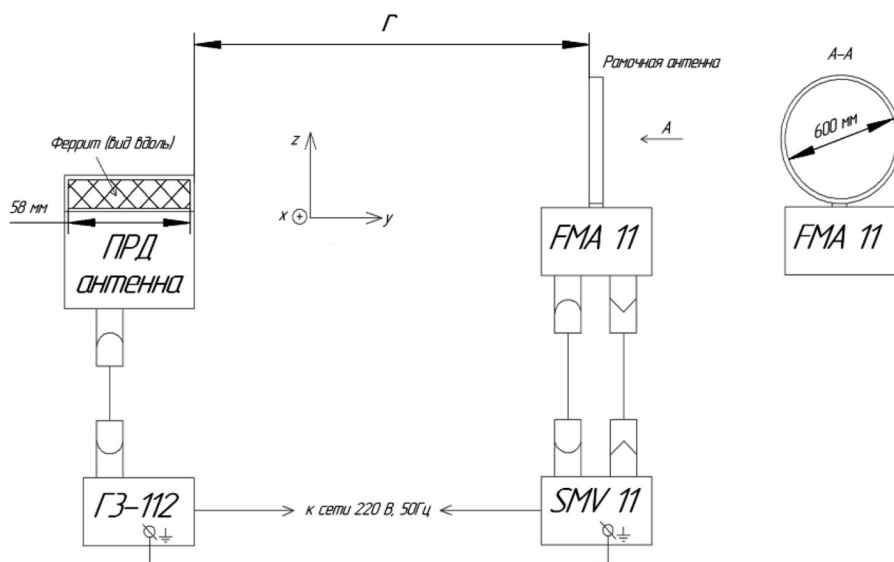


Рис. 5. Структурная схема измерения напряженности поля

Fig. 5. Block diagram of field strength measurement

В нашем случае для пересчета полученных значений в эквивалентной напряженности электрического поля ( $E^{Z_{экв}}$ ) в единицах [дБ(мкВ/м)] необходимо воспользоваться формулой:

$$H_y = E^{Z_{экв}} / 120\pi, \quad (2)$$

где  $H_y$  – расчетное значение напряженности поля [дБ(мкА/м)], магнитная составляющая.

Структурная схема рабочего измерения напряженности поля приведена на рис. 5. Передатчик с антенной закреплен на штативе и направлен по оси Y для регистрации вертикальной компоненты магнитного поля  $H_y$ , подключается к генератору ГЗ–112. Регистрация магнитного поля проводилась на рамочную антенну FMA 11, установленную на штатив, ориентированную по оси Y и подключенную к селективному вольтметру. Приемная антенна удаляется от передающей на расстояние 2–6 м и регистрирует магнитную составляющую поля на частотах 20–100 кГц с шагом 10 кГц, а также ЭДС, наведенное на антенне.

### Обсуждение результатов исследования

На рис. 6 приведены значения тока  $I$  (мА), подводимого к передающей антенне. Измерения проводились на расстояниях  $r$ , значительно превышающих размеры антенны. Измеренные данные дают зависимость тока, подаваемого к витку на феррите, от частоты колебательного контура поративного передатчика для детонатора, во втором случае на виток подается ток в 2 раза меньше.

На рис. 7 показана зависимость вертикальной компоненты магнитного поля (вдоль оси передающей антенны) от частоты при удалении от приемной петлевой антенны для двух вариантов тока антенны. Из данных можно вывести, что основные потери напряженности поля происходят в области 4 метров от антенны. При понижении силы тока антенны в 2 раза уровень поля и ЭДС на приемной антенне падает на 3–5 дБ (в 1,41–1,78 раз). В диапазоне 20–100 кГц уровень  $H_y$  падает на 5–8 дБ (мкА/м).

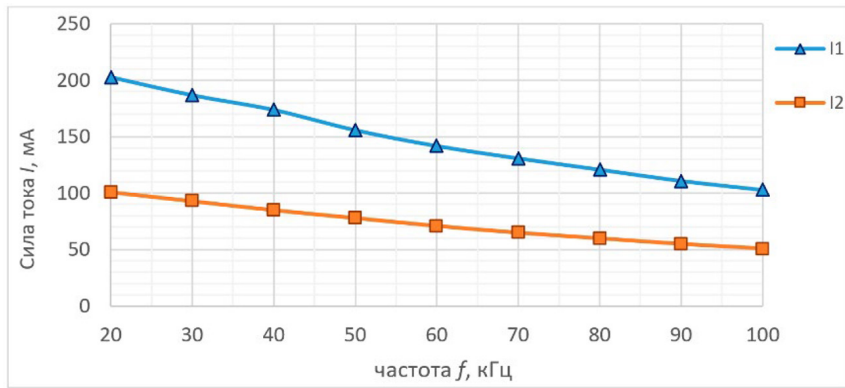


Рис. 6. Сила тока, выдаваемая колебательным контуром передатчика для обратного канала

Fig. 6. The current output by the oscillating circuit of the transmitter for the return channel

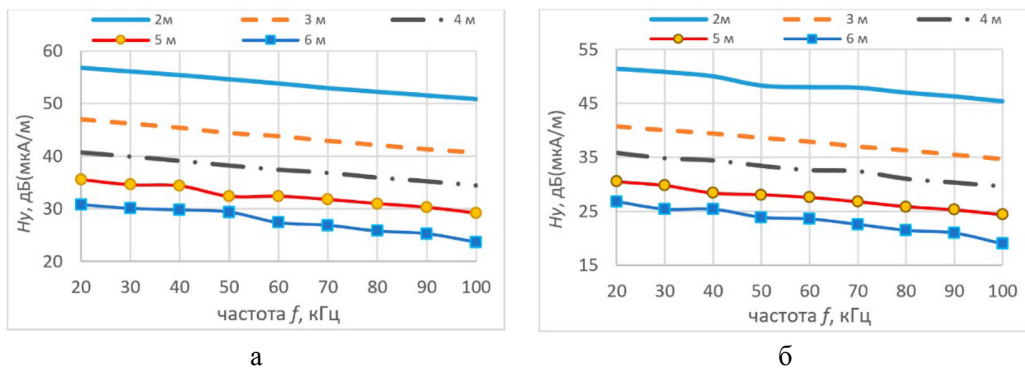


Рис. 7. Зависимость уровня вертикальной компоненты магнитного поля от частоты в воздухе для ряда расстояний 2–6 м при силе тока в контуре  $I_1$ (а)  $I_2$ (б)

Fig. 7. Dependence of the level of the vertical component of the magnetic field on the frequency in the air for a number of distances of 2–6 m at the current strength in the circuit  $I_1$ (a)  $I_2$ (б)

Напряжение, измеренное селективным вольтметром при токе  $I_1$  и  $I_2$  для ряда частот, показано на рис. 8. При понижении тока на передающей антенне напряжение также падает на 3–5 дБ. При увеличении частоты до 100 кГц напряжение на вольтметре возрастает на 6 дБ(мкВ), что делает частоту 80 кГц наиболее эффективной при измерении в воздухе.

Данные измерений передающей антенны для скважинного передатчика позволяют получить уровень магнитного поля и ЭДС в условиях грунтовой скважины, преобразуя измеренные данные с учетом коэффициента поглощения, зависящего от электропроводности и частоты ЭМ поля [10]:

$$k = \sqrt{i\sigma\mu\omega + \varepsilon\mu\omega^2} = k' + ik'', \quad (3)$$

$$k' = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{2} \cdot \left[ \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2 + 1} + 1 \right]}, \quad (4)$$



$$k'' = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{2} \cdot \left[ \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2 + 1} - 1 \right]}, \quad (5)$$

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

При фиксированном значении  $\mu_r=1$  для грунтов меняются лишь параметры диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  (от 4 до 80) и электропроводности ( $10^{-5}$ – $0,1$  См/м). Интерполяция полученных данных на большее расстояние и учет поглощения позволяют получить оценку уровня поля и сигнала на поверхности грунта для ряда электропроводности  $\sigma=1E-3$ – $1E-1$  См/м, соответствующей грунтам [9, 10]. Анализ будет проведен для тока  $I_1$ .

Моделирование на основе полученных данных, учитывающее затухание ЭМ поля в грунте, показывает, что значительное падение напряженности характерно для среды с  $\sigma=0,1$  См/м, что соответствует грунтам с сильной обводненностью из-за грунтовых вод или осадков. С увеличением расстояния до 20–30 м в этом случае уровень магнитного поля падает значительно на 10–40 дБ (рис. 9).

Графики уровня поля и ЭДС, наведенного на приемной антенне, показывают, что для большинства видов грунтов и глинистых почв реализация обратного канала возможна на глубине до 20–25 м, так как уровень сигнала на данных отметках не ниже 0 дБ, что дает  $U > 1$  мкВ (рис. 10). При наличии низкоомных слоев грунта большой мощности (обводненная дождевой или грунтовой водой почва или песок) доступная глубина снижается до 10–15 м. Это требует больших энергетических затрат на излучение. В данном случае необходимо сократить количество сеансов обмена данными между сейсмостанцией и исполнительным устройством и активировать обратный канал по запросу. Это необходимо для экономии энергии батареи, так как после помещения детонатора в скважину подзарядка не предусматривается. Также при приеме сигнала рекомендуется накопление сигнала в случае малого отношения с/ш ввиду требования

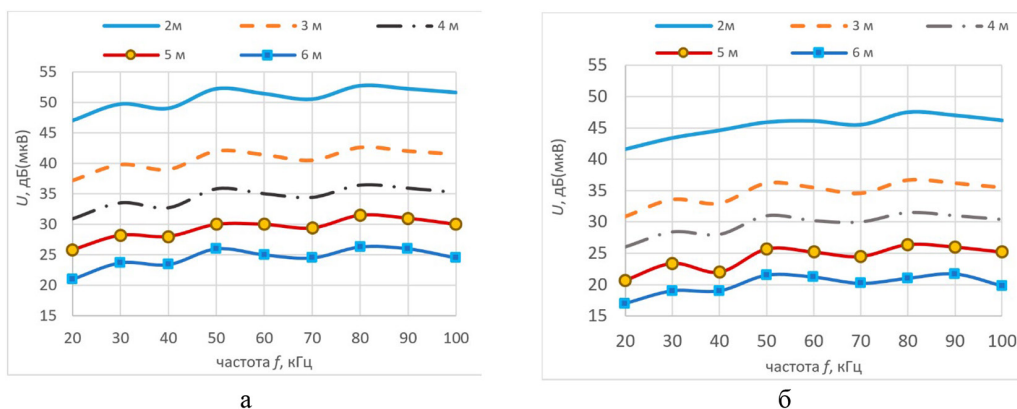


Рис. 8. Зависимость напряжения, измеренного микровольтметром, от частоты в воздухе для ряда расстояний 2–6 м при силе тока в контуре  $I_1$ (а)  $I_2$ (б)

Fig. 8. Dependence of the voltage measured by a microvoltmeter on the frequency in the air for a number of distances of 2–6 m at the current strength in the circuit  $I_1$ (a)  $I_2$ (б)

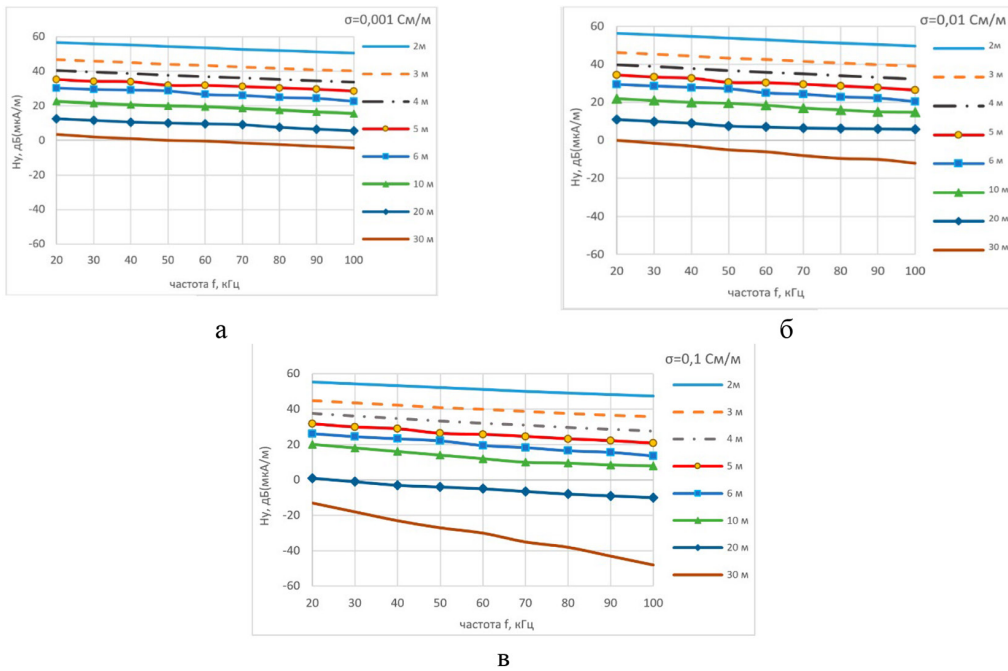


Рис. 9. Зависимость уровня магнитного поля в поглощающей среде от частоты на расстоянии 2–30 м: а –  $\sigma=0,001$  См/м; б –  $\sigma=0,01$  См/м; в –  $\sigma=0,1$  См/м

Fig. 9. Dependence of the magnetic field level in the absorbing medium on the frequency at a distance of 2–30 m: а –  $\sigma=0.001$  См/м; б –  $\sigma=0.01$  См/м; в –  $\sigma=0.1$  См/м

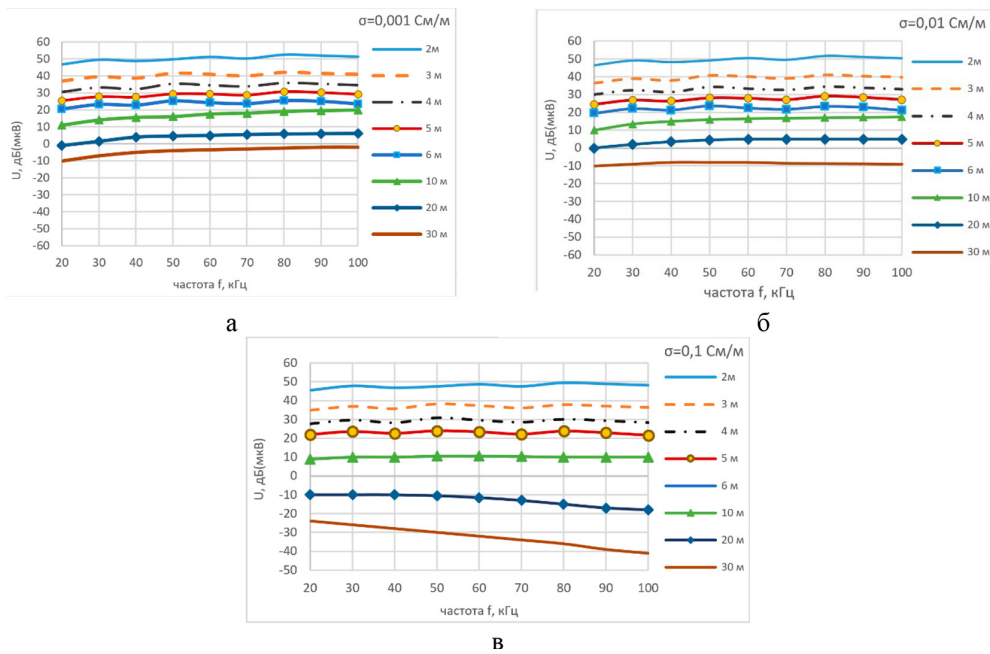


Рис. 10. Зависимость уровня магнитного поля в поглощающей среде от частоты на расстоянии 2–30 м: а –  $\sigma=0,001$  См/м; б –  $\sigma=0,01$  См/м; в –  $\sigma=0,1$  См/м

Fig. 10. Dependence of the magnetic field level in the absorbing medium on the frequency at a distance of 2–30 m: а –  $\sigma=0.001$  См/м; б –  $\sigma=0.01$  См/м; в –  $\sigma=0.1$  См/м

низкой вероятности ошибки. Частотный диапазон 30–60 кГц является наиболее эффективным по параметру уровня ЭДС вольтметра, что делает реализацию канала возможной, однако потребность подтверждения от беспроводных детонаторов требует множества рамочных приемных антенн при контроле ряда скважин.

### Выводы

Исходя из ограничений, связанных с размерами грунтовой скважины, глубиной закладки взрывателя, ограниченного заряда батареи и электрофизических свойств грунтов, было предложено конструкторское решение. Для работы в низкочастотном диапазоне более предпочтительно использование магнитной составляющей электромагнитного поля. Это обусловлено компактностью ферритовых антенн в виде многовитковых катушек на ферритовом сердечнике, а также тем, что магнитная составляющая поля претерпевает меньшее затухание в сплошных средах. Так, приемная и передающая антенны исполнительного устройства реализованы на одном ферритовом стержне. Передающая антенна включает в себя 1 виток, соединенный с трансформатором на ферритовом кольце, передающая реализована в виде катушки из  $n$  витков. Для приема сигнала предлагается использовать рамочную магнитную антенну диаметром 600 м, располагая ее в области скважины.

Данные измерений и моделирование излучения в грунте показывают сильное влияние на магнитную составляющую поля грунтов с высокой электропроводностью, что возможно при высокой влажности. В этом случае прилагается ряд решений по повышению отношения сигнал/шум: глубину закладывания заряда необходимо сократить до 15 м; увеличить эффективную площадь приемной антенны; увеличить время накопления сигнала, что приведет к снижению заряда батареи.

Исследование показывает, что реализация обратного канала связи детонатора с сейсмостанцией для целей сейсморазведки возможна. Для большинства типов грунтов наиболее благоприятный частотный диапазон по уровню ЭДС – от 30 до 60 кГц.

### Список литературы / References

- [1] Патент № CN 101995196A «Wireless blasting system and communication method thereof». Daiwan Li, Dazhi Wang, Xingwang Zheng, Ze Se, Zhangjun Li. Опубликовано 30.02.2011 г.
- [2] Патент № US 2005030695A1 «Frequency diversity remote controlled initiation». Lownds Charles Michael, Meyer Erich Nicol. Опубликовано 10.02.2005 г.
- [3] Патент № WO1991007637A1 «Remote detonation of explosive charges». Sek Kwan Chan, Ronald F Stewart, Howard A Vampfield Опубликовано 30.05.1991 г.
- [4] Патент № RU 2016 141 955 А «Аппарат, система и способ». Джонсон Дэвид, Гудридж Ричард, Викс Байрон, Эпплби Родни. Заявитель Orica Explosives Technology Pty Ltd. Опубликовано 23.03.2015 г.
- [5] Патент № 2016 141 954 А «Аппарат, система и способ». Викс Байрон, Котсонис Стивен. Заявитель Orica Explosives Technology Pty Ltd. Опубликовано 28.04.2018 г.
- [6] Патент № JP1998141900 «Remotely operable wireless blasting apparatus for disposing explosive and method of disposing explosive using the same». Suzuki Satoshi. Опубликовано 29.05.1998 г.

[7] Патент № ЕА031120В 1 «Выборочное управление группами детонаторов». Крейг Чарльз Шленгер, Джонатан Гаунден. Опубликовано 11.30.2018 г.

[8] Патент № WO2020037336A1 «Wireless detonating system». Maurissens Danie, 1 August Julien Louis. Опубликовано 20.02.2020 г.

[9] Иголкин В.И., Шайдуров Г.Я., Тронин О.А., Хохлов М.Ф. *Методы и аппаратура электроразведки на переменном токе*. Красноярск, Сиб. федер. ун-т, 2016. 272 [Igolkin V.I., Shaidurov G. Ya., Tronin O. A., Khokhlov M. F. *Methods and equipment of electrical exploration on alternating current*. Krasnoyarsk, Sib. feder. un-t, 2016. 272 (in Rus.)]

[10] Жданов М.С. *Геофизическая электромагнитная теория и методы*. Пер. с англ. Под ред. Е.П. Велихова. М., Научный мир, 2012. 680 [Zhdanov M.S. *Geophysical electromagnetic theory and methods*. Trans. from English. Edited by E.P. Velikhov. M., Scientific World, 2012. 680 (in Rus.)]