

Научная статья
УДК 550.8.055
DOI: <https://doi.org/10.18127/j5604128-202503-08>

Развитие глубинной георадиолокации

А.А. Аверин¹, В.В. Антипов², Д.С. Горкин³, **В.В. Копейкин⁴**,
Д.А. Смирнов⁵, А.А. Пивторак⁶, В.И. Сахтеров⁷

^{1-5,7} Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (Москва, Россия)

⁶ Deep GPR Research (Санкт-Петербург, Россия)

⁷ ООО «НПО Радиолокация в геофизике и радиофизике» (Москва, Россия)

³ gorkin@izmiran.ru, ⁶ info@deep-gpr.com, ⁷ sakhterov@mail.ru

Аннотация

Постановка проблемы. В геофизике (в разделе электроразведка) за последние 45 лет широкое распространение получил георадиолокационный метод подповерхностного радиозондирования (георадар). Бесконтактный способ измерения на основе распространения и отражения электромагнитных волн придает георадарному методу измерения преимущества перед классическими методами электроразведки, расширяя область применения и детализацию исследований. Кроме того, метод георадаров позволяет проводить измерения на некотором расстоянии прибора от поверхности.

Цель. Предложить теорию расчетов предельных глубин для разных пород, провести численные расчеты и сравнить полученные результаты с экспериментальными данными. Обобщить практические данные использования георадаров с разделением на подповерхностные и глубинные. Показать области применения и глубины исследований георадаров различных изготовителей.

Результаты. Представлена теория расчета предельных глубин георадиолокации на базе формул Максвелла, связанных с частотой и проводимостью пород. Приведены формулы и построены графики, которые указывают на сходимость расчетов по классической адаптированной формуле радиолокации для полупроводящих сред горных пород. По данной формуле произведены расчеты в полупроводящих средах горных пород с разным погонным затуханием. Выполнено сравнение полученных численных значений с результатами практических работ, подтверждающих эти расчеты.

Практическая значимость. На основе теоретических расчетов и экспериментальных данных появилась возможность произвести частотное разделение классических высокочастотных и низкочастотных глубинных георадаров, а также показать влияние характеристик различных пород на результаты подповерхностного радиозондирования для низкочастотных георадаров повышенной мощности на глубине 200 м и более.

Ключевые слова

Георадиолокация, георадар, антенна, затухание, импульсный передатчик, полупроводящие среды, горные породы

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-02-00083-П.

Для цитирования

Аверин А.А., Антипов В.В., Горкин Д.С., **Копейкин В.В.**, Смирнов Д.А., Пивторак А.А., Сахтеров В.И. Развитие глубинной георадиолокации // Электромагнитные волны и электронные системы. 2025. Т. 30. № 3. С. 62–75. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202503-08>

A brief version in English is given at the end of the article

Введение

Георадиолокация или георадарный метод геофизических исследований широко представлен в инженерных изысканиях, археологических поисках, строительном контроле, геологическом поиске и в научных исследованиях. Это связано с тем, что применение георадарного метода значительно повышает информативность и детальность получаемых данных. Метод применяется при дефектоскопии зданий и сооружений, при поиске коммуникаций, археологических и инженерно-геологических исследованиях, а также при геологоразведке. Такое широкое применение стало возможно благодаря значительному прорыву, который произошел в георадиолокации за последние десятилетия. Технологические инновации позволили разработчикам значительно повысить глубину исследований, что привело к расширению сферы применения.

На сегодняшний день сформировался основной международный «костяк» компаний, которые занимаются производством и разработкой нового оборудования. Среди них такие известные бренды как LOZA (Россия), GROT (Россия), Логис (Россия), GSSI (США), MALA/RAMAC (Швеция), NOGGIN (Ка-

© Аверин А.А., Антипов В.В., Горкин Д.С., **Копейкин В.В.**, Смирнов Д.А., Пивторак А.А., Сахтеров В.И., 2025

нада) [1–4]. Производимое ими оборудование условно можно разделить на два класса: 1) малоглубинное (классическое – на основе стробоскопического осциллографа); 2) глубинное. Более 90% всех компаний, предоставляющих георадарные услуги, работают в малоглубинной георадиолокации.

Ц е л ь р а б о т ы – предложить теорию расчетов предельных глубин для разных пород, провести численные расчеты и сравнить полученные результаты с экспериментальными данными. Обобщить практические данные использования георадаров с разделением на подповерхностные и глубинные. Показать области применения и глубины исследований георадаров различных изготовителей.

Материалы и методы решения

Согласно адаптированной формуле радиолокации для подповерхностного зондирования рассчитаем максимальные глубины, построим графики для различных типов георадаров для ряда частот (длин волн) и передатчиков с разным уровнем мощности [5, 6]:

$$H_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{пд}} G^2 \lambda^2 \sigma_{\text{ц}}}{(4\pi)^3 P_{\text{ш}}}} e^{-0,115 \cdot \Gamma \cdot H_{\max}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{пд}} = U_{\text{пд}}^2 / R_a$ – импульсная мощность, подводимая к передающей антенне, Вт; $U_{\text{пд}}$ – амплитуда импульса возбуждения передающей антенны, В; R_a – сопротивление приемной и передающей антенн, Ом; G – коэффициент усиления приемной и передающей антенн; λ – длина волны, м; $\sigma_{\text{ц}}$ – эффективная поверхность рассеивания – площадь отражения, м²; $P_{\text{ш}} = U_{\text{ш}}^2 / R_a$ – мощность шумов на входе приемника, Вт; $U_{\text{ш}}$ – чувствительность, приведенная ко входу приемника, В; Γ – затухание сигнала, дБ/м.

Уравнение (1) трансцендентное, решается графически или итерационным подбором с любой требуемой точностью с помощью современных вычислительных средств.

На рис. 1 представлены графики численных расчетов глубины отраженного сигнала в зависимости от поглощения изучаемой среды для антенн с различными центральными частотами, довольно различимо производится разделение на частотах между 50 МГц и 75 МГц. Исходя из этих данных, к малоглубинным (классическим) георадарам относится оборудование с центральной частотой антенн от 75 МГц до 1500 МГц и амплитудой сверхширокополосного (СШП) импульса от 100 В до 1200 В. Этих характеристик вполне достаточно для проникновения на глубины первых метров.

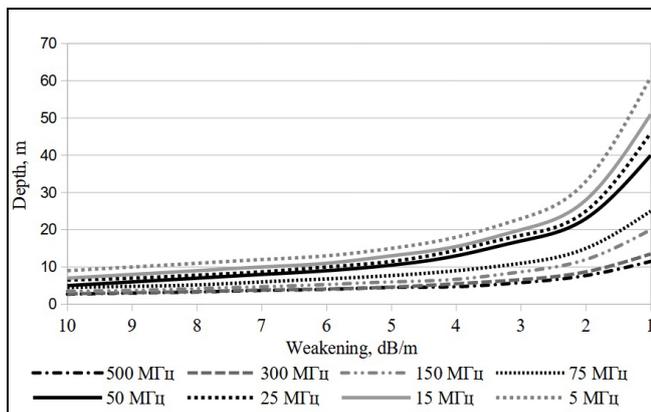


Рис. 1. Графики зависимости глубины георадиолокации от частоты (длины антенн) для полупроводящих сред (горных пород) с коэффициентом затухания 1–10 дБ/м

Fig. 1. Graphs of the dependence of the depth of georadiolocation on the frequency (antenna length), for semi-conducting media (rocks) with a attenuation coefficient of 1–10 dB/m

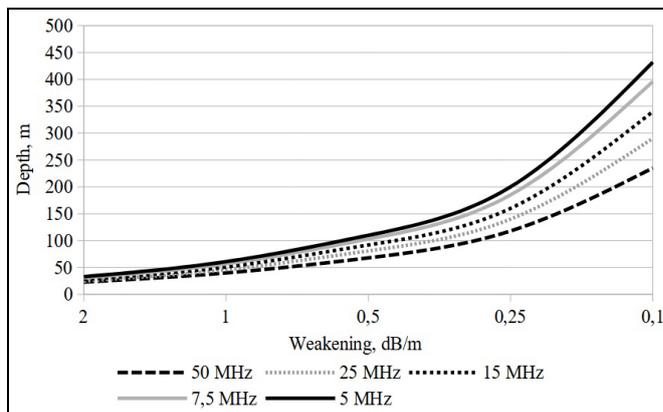


Рис. 2. Графики частотной зависимости глубины георадиолокации на низких частотах для полупроводящих сред (горных пород) с коэффициентом затухания 0,1–2 дБ/м

Fig. 2. Graphs of the dependence of the depth of georadiolocation at low frequencies for semiconducting media (rocks) with a attenuation coefficient of 0,1–2 dB/m

Как видно из графиков на рис. 2, на частотах 5–50 МГц можно достигать глубин 100 м и более с коэффициентом затухания сред 0,25 дБ/м и менее. В указанном диапазоне низких частот затухание в средах в разы меньше, чем на высоких частотах. Это связано с особенностями прохождения электромаг-

нитного сигнала через полупроводящие среды горных пород и было подмечено многими исследователями в данной области. В результате выведены четыре характерные модели затухания для разных частот и сред [7].

К глубинным относятся георадары с центральной частотой антенны 5–50 МГц, амплитудой СШП-импульса от 15 кВ до 150 кВ. Для проверки результатов численных вычислений были проведены экспериментальные работы [8, 9] по сравнению характеристик георадаров различных производителей. На основе накопленных результатов была предложена методика сравнения георадаров с размерами антенн от 0,3 м до 6 м и использованием передатчиков с амплитудой СШП-импульса от 0,6 кВ до 32 кВ.

На рис. 3 приведены результаты экспериментальных измерений антенн с различными центральными частотами и СШП-импульсами амплитудой U_{tx} от 0,1 кВ до 60 кВ. Графики зависимости глубины георадиолокации от СШП-импульса высокочастотных антенн свыше 75 МГц представлены на рис. 3,а, а низкочастотных антенн – на рис. 3,б (частота 75 МГц приведена для сравнения). Со штатными высокочастотными антеннами серийных георадаров удалось провести измерения при напряжениях до 5 кВ, более высокие напряжения невозможно применить по конструктивным показателям. Как видно из графиков (рис. 3), для высокочастотных антенн характерно линейное увеличение глубины при увеличении амплитуды СШП-импульса. Для низкочастотных антенн, применяемых глубинными георадарами, есть небольшое экспоненциальное увеличение глубины при увеличении амплитуды СШП-импульса, предположительно связано с местом проведения экспериментов, где глубина верхних осадочных пород (глина, суглинки) составляет около 10 м, далее следуют слои известняка с более низким поглощением сигнала, что позволило получить отражение с больших глубин.

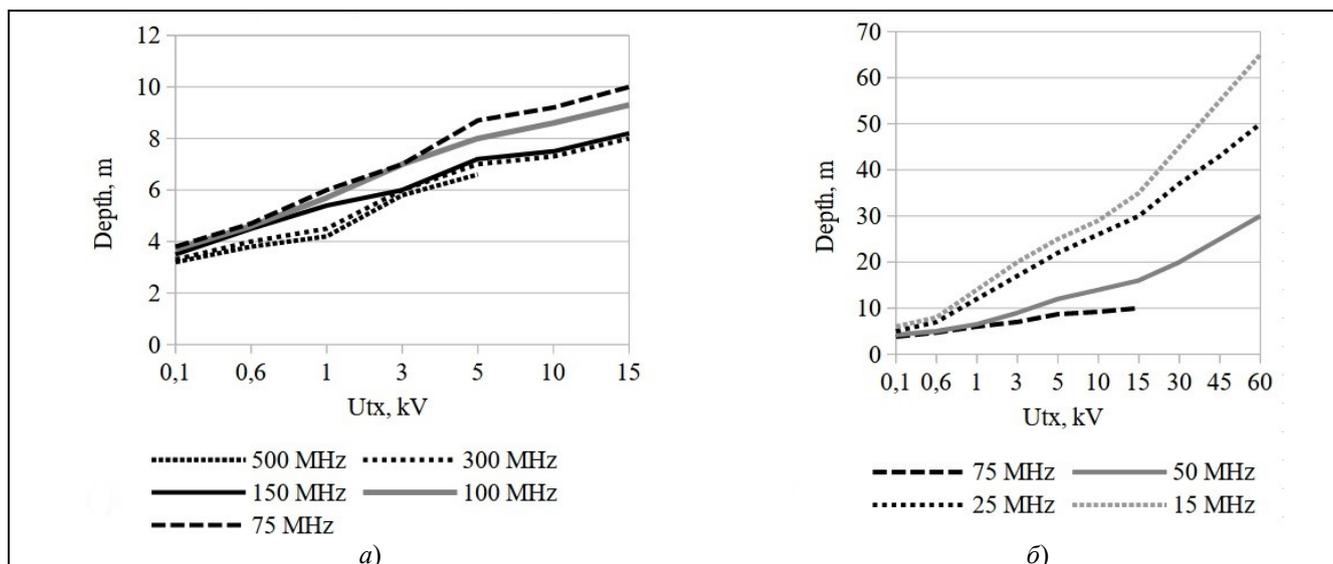


Рис. 3. Графики зависимости глубины георадиолокации от СШП-импульса для высокочастотных (а) и глубинных (б) георадаров
 Fig. 3. Graphs of the dependence of the depth of georadiolocation on the ultra-broadband pulse for high-frequency (a) and deep (b) ground-penetrating radars

Распространение электромагнитных импульсов в полупроводящих средах

Рассмотрим иной подход расчета предельных глубин георадиолокации на базе формул Максвелла, связанных с частотой и проводимостью пород. Выведены новые формулы и построены графики зависимости глубины от частоты и проводимости. Данное решение было предложено в ИЗМИРАН в 1990-е годы В.В. Копейкиным, однако в связи с его кончиной расчеты не были экспериментально проверены. В данной работе представлены результаты численного моделирования и сравнение с результатами экспериментальных данных. Все волновые уравнения электродинамики являются следствием полной системы уравнений Максвелла, которая приведена ниже, с использованием системы единиц СИ [10]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}, \tag{2}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (3)$$

вместе с материальными уравнениями среды:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}, \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H}, \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (7)$$

$$\mathbf{J} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}), \quad (8)$$

где

$$\varepsilon_0 = (\mu_0 c^2)^{-1} = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m};$$

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{V \cdot s}{A \cdot m}.$$

При выводе уравнений для подземной радиолокации пренебрегаем членом $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ в (8), а в (5) будем считать $\mu = 1$. Практически для всех подземных сред эти предположения справедливы. Волновое уравнение для электрической компоненты \mathbf{E} можно получить следующим путем. Продифференцируем (8) по времени t , а уравнение – по пространственным координатам, используя оператор $\nabla \times$, после чего получим:

$$\nabla \times \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \quad (9)$$

$$-\nabla^2 \mathbf{E} = -\mu_0 \nabla \times \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}. \quad (10)$$

Из (9) и (10) следует волновое уравнение для электрической компоненты \mathbf{E} электромагнитной волны в среде, характеризуемой диэлектрической проницаемостью ε и проводимостью σ :

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0, \quad (11)$$

где $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$ – скорость света в вакууме.

Проводимость среды σ присутствует в волновом уравнении (11) как коэффициент перед первой производной по времени, которая, как известно, определяет диссипацию (поглощение) волновой энергии. Собственно говоря, диссипативный член ограничивает все возможности подземной радиолокации, включая глубину зондирования и пространственное разрешение (при $\sigma = 0$ радиоволны в среде затухают только за счет расходимости, а это означает возможность достижения больших глубин и разрешения).

Для выяснения особенностей распространения радиоволн в проводящей среде перейдем из временной области в частотную, что упрощает дальнейшие выкладки. С этой целью решение волнового уравнения (11) будем искать в виде затухающей монохроматической волны:

$$E = \exp(-px - ikx + i\omega t), \quad (12)$$

где p – коэффициент затухания; k – волновое число; ω – круговая частота.

Подставив (12) в исходное (11), получим уравнение, связывающее параметры волны (12) с проводимостью среды σ :

$$p^2 - k^2 + 2ipk + \frac{\varepsilon\omega^2}{c^2} - i\omega\mu_0\sigma = 0. \quad (13)$$

Приравнивание к нулю действительной и мнимой частей (13) приводит к биквадратному уравнению:

$$p^4 + \frac{\varepsilon\omega^2}{c^2} p^2 - \frac{\omega^2 \mu_0^2 \sigma^2}{4} = 0. \quad (14)$$

Решение уравнения (14) записывается как

$$p = \sqrt{-\frac{\varepsilon\omega^2}{2c^2} + \sqrt{\frac{\varepsilon^2\omega^4}{4c^4} + \frac{\mu_0^2\sigma^2\omega^2}{4}}}, \quad (15)$$

знаки перед корнями выбраны из условия физической реализуемости результата.

Рассмотрим две асимптотики функции (15):

- 1) низкочастотную ($\omega \rightarrow 0$);
- 2) высокочастотную ($\omega \rightarrow \infty$).

В области низких частот коэффициент затухания выражается следующим образом:

$$p = \sqrt{\frac{\mu_0\sigma\omega}{2}}. \quad (16)$$

Согласно численным расчетам, произведенным по выше предложенным формулам, низкими частотами являются значения 50 МГц и ниже, а высокими – свыше 75 МГц. График зависимости коэффициента затухания p от частоты в области низких частот приведен на рис. 4. В области высоких частот коэффициент затухания выражается как

$$p = \frac{\mu_0\sigma c}{2\sqrt{\varepsilon}}. \quad (17)$$

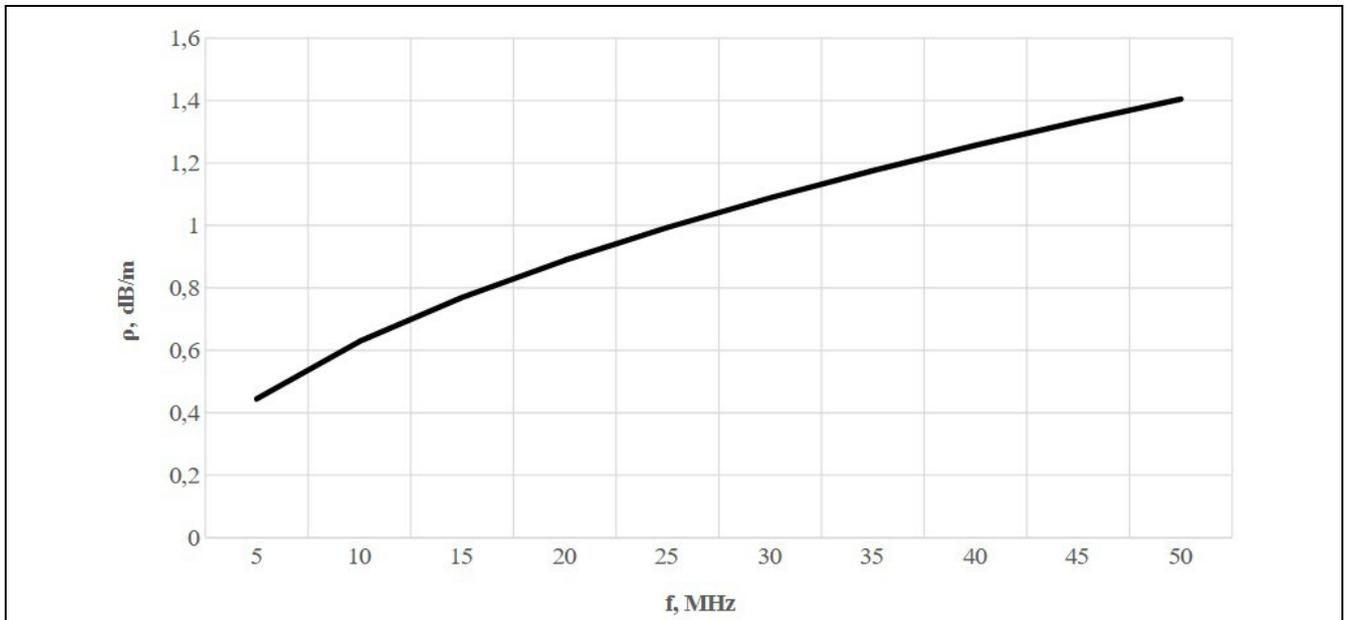


Рис. 4. График зависимости коэффициента затухания от частоты в области низких частот

Fig. 4. Dependence of the attenuation coefficient p in the low frequency region

На рис. 5 представлены графики зависимости значения коэффициента затухания p для различных сред. Данные для расчетов взяты из [11–13]. В этих двух предельных случаях проводимость среды влияет на распространение радиоволн по-разному. В области низких частот затухание зависит от частоты и

при ее снижении может быть сколь угодно малым. Однако в этом диапазоне широкополосные сигналы испытывают дисперсию, т.е. искажение своей формы. В области высоких частот дисперсия не зависит от частоты, что приводит при распространении радиоимпульса только к уменьшению его амплитуды без изменения формы.

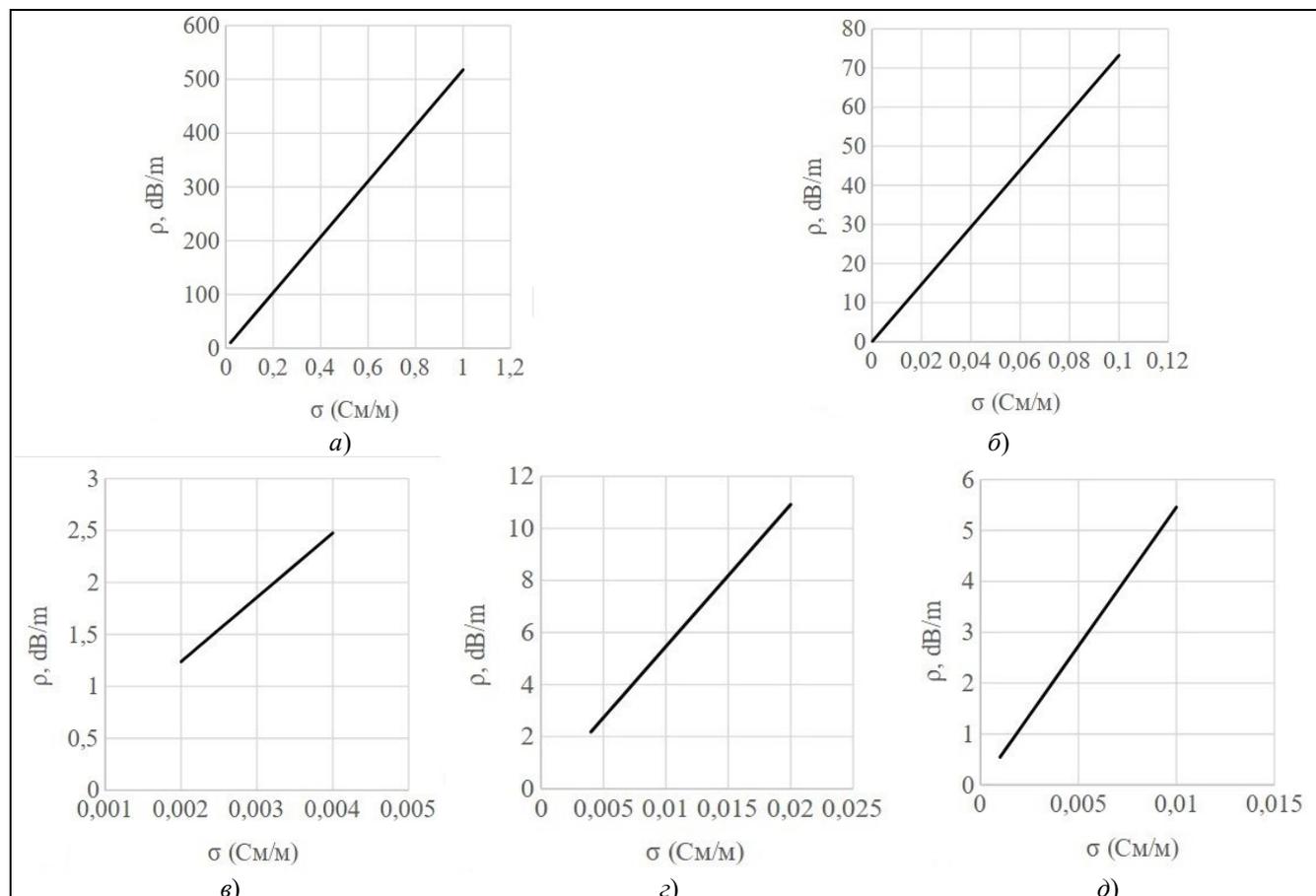


Рис. 5. Графики зависимости коэффициента затухания от проводимости для глины (а), каменного угля (б), суглинка каштанового (в), суглинка серого (г) и песка (д) в области высоких частот

Fig. 5. Graphs of the dependence of attenuation on conductivity for clay (a), coal (b), chestnut loam (c), gray loam (d) and sand (e) in the high frequency range

Частота, разграничивающая эти два механизма распространения радиоволн, зависит от проводимости и диэлектрической проницаемости среды

$$\omega = \frac{c^2 \mu_0 \sigma}{\varepsilon}, \tag{18}$$

для циклической частоты, или $f = \omega / (2\pi)$:

$$f = \frac{18 \cdot 10^9 \cdot \sigma}{\varepsilon}. \tag{19}$$

Например, при $\sigma = 10^{-2}$ и $\varepsilon = 10$, разграничивающая частота $f = 18$ МГц. Такие параметры среды характерны для Подмосковья. Это решение справедливо для расчетов параметров георадаров при равных условиях, когда мощность передатчика и коэффициент усиления антенн постоянны и не меняются для всех частот.

На рис. 6 приведен график зависимости частоты от сопротивления горных пород. В горных породах с электрическим сопротивлением ниже 50 Ом/м эффективно работать могут только георадары на частоте

тах ниже 50 МГц. Слева выделена область 10–50 Ом/м для низких частот 1–50 МГц, справа – для высоких частот 50–180 МГц до полного затухания.

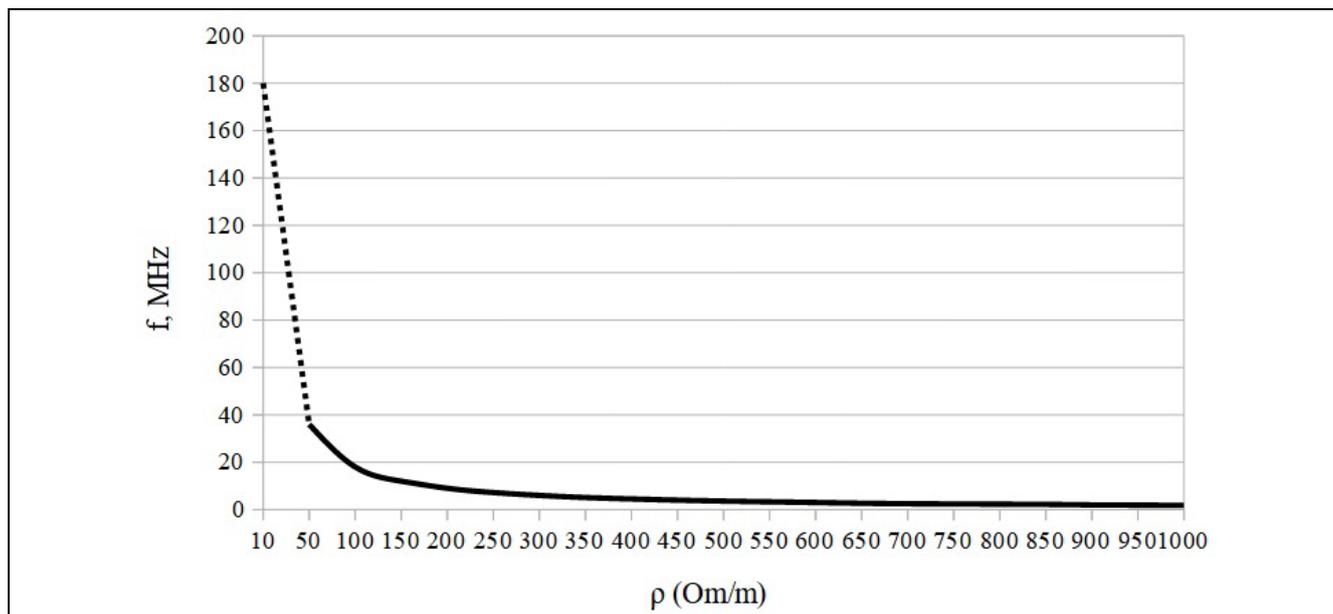


Рис. 6. График зависимости частоты от сопротивления горных пород

Fig. 6. Graph of frequency dependence on rock resistance

Приведем (17) к более привычному виду, выражающему погонное затухание W в неперках (Нп) в децибеллы (дБ) на метр.

Для перевода используем соотношение

$$1 \text{ Нп} = 20 \lg e \approx 8,68 \text{ дБ}.$$

Таким образом, погонное затухание в децибеллах на метр можно представить следующим образом:

$$W_2 = p \cdot 8,686,$$

$$W_2 = 8,686 \cdot \frac{\mu_0 \sigma c}{2\sqrt{\varepsilon}}.$$

Учитывая значения констант

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м},$$

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с},$$

вычисляем коэффициент

$$8,686 \cdot \frac{(4\pi \cdot 10^{-7})(3 \cdot 10^8)}{2} \approx 8,686 \cdot 188,5 \approx 1637,311 \approx 1637.$$

Окончательно получаем формулу

$$W_2 = 1637 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{\varepsilon}}, [\text{дБ/м}]. \quad (20)$$

В реальной ситуации породы, составляющие геологические слои, могут иметь зависимые от частоты параметры ε и σ , что необходимо учитывать при оценке затухания волн. Данные формулы были выведены В.В. Копейкиным и ранее публиковались только на сайте ООО «ВНИИСМИ» [14].

Результаты и их обсуждение

Классический метод расчета предельных глубин георадаров по адаптированной формуле радиолокации для полупроводящих сред горных пород показывает сходимость результатов с теоретическим методом расчетов предельных глубин георадаров на базе формул Максвелла, связанных с проводимостью и частотой.

Глубин зондирования до 100 м и более можно достичь использованием оборудования повышенной мощности (с длинными антеннами) в области низких частот. Отдельным направлением является разработка аппаратуры для глубинных исследований. Производители георадарного оборудования стараются освоить это направление, поскольку есть значительный спрос на зондирование глубже 15–20 м. В этой области находится решение многих инженерных и геологоразведочных задач.

К сожалению, достичь таких глубин, используя базовые характеристики оборудования, не получается. Производители понижают рабочую частоту антенн до 25–50 МГц, незначительно увеличивают напряжение полупроводниковых передатчиков (максимум до 2000 В – это мощность не более 80 кВт), но существенного увеличения глубины не происходит. На сегодняшний день можно с уверенностью сказать, что западные производители георадаров смогли освоить глубины до 30 м. Большое количество опубликованных статей на различных интернет-площадках демонстрирует опытно-методические работы, выполняемые под эгидой профильных геологических институтов в соавторстве с научным сообществом, где решаются задачи на глубинах до 30 м.

Рассмотрим работы, выполненные на зарубежных георадарах, собранных по схеме передатчиков на транзисторах. Максимальная глубина до 75 м:

визуализация структуры и характеристик приповерхностной вечной мерзлоты с помощью георадара. Канада. Марка георадара неизвестна. Глубина 25 м. Геологический факультет, университет Святого Лаврентия, Кантон, Нью-Йорк, США [15];

компания Earth Scan (Канада). Георадар 40 МГц. Отложения песка и гравия. Глубина 75 м [16];

компания Ground radar (Австралия). Пегматиты литийсодержащие. Георадар 40 МГц. Глубина 70 м [17];

презентационный материал компании GSSI производителя георадаров серии Sir. Георадар 100 МГц. Песчаные отложения. Глубина 40 м [18].

Полученные в ходе выполнения научных и коммерческих работ результаты с уверенностью можно назвать значительным прорывом в глубинной георадиолокации. Стоит отметить, что данные работы выполнялись с использованием передатчиков относительно небольшой мощности до 10 кВт, напряжением 400–700 В. Результаты показывают, что даже при такой мощности можно достигать глубин исследований более 15 м в породах с низким коэффициентом затухания.

Лидерство в производстве глубинных георадаров, по праву, принадлежит российским производителям георадаров «ЛЮЗА», «ГРОТ», «ЭХО СФЕРА», которые на сегодняшний день являются самыми глубинными георадарными комплексами в мире. Нашим специалистам удалось по-новому взглянуть на физические принципы конструирования высоковольтных передатчиков, работающих на импульсном токе, что позволяет значительно увеличить энергетический потенциал.

Основным этапом развития глубинных георадарных технологий можно считать создание первого передающего генератора напряжением 16 кВ. Данный генератор был разработан компанией ВНИИСМИ, производителем георадарной аппаратуры «ЛЮЗА». Дальнейшее увеличение мощности генератора затруднительно, поскольку для работы георадара требуется повторение импульсов передатчика с частотой 250–300 Гц. Это ведет к большим потреблением энергии и быстрому выходу из строя высоковольтного разрядника передатчика.

Передатчики георадаров серии «Грот» и «ЭХО СФЕРА» работают в режиме излучения СШП-импульсов с частотой 10–100 Гц, что позволяет увеличить мощность передатчиков и сохранить их ресурс. При работах георадара «Грот-12» испытан передатчик с амплитудой СШП-импульса 48 кВ, достигнуты глубины в известняках до 500 м [19]. У георадара «ЭХО СФЕРА» есть линейка работающих образцов передатчиков напряжением от 5 до 100 кВ, при использовании их с антеннами 5–50 МГц глубина зондирования может превышать глубину 300 м в грунтах с высоким сопротивлением, типа песчаников, известняков и других горных пород с низким погонным затуханием на низких частотах. Это самые мощные и глубинные георадары в мире [20–22].

Наши передатчики разработаны на базе высоковольтных российских разрядников и полностью на элементной российской базе и позволяют повысить напряжение до 150 кВ и выше, это существующая пиковая мощность портативного передатчика 450 МВт. Частота повторения импульсов 1 Гц. В настоящее время ведутся тестовые испытания передатчика на 300 кВ.

Ведущие западные компании и университеты приобретают глубинные георадарные комплексы российского производства и на практике доказывают эффективность их применения. Крупные региональные геофизические и геологоразведочные компании используют отечественные георадары для выполнения глубинных исследований. К таким компаниям относятся АЛРОССА (Россия), ZapceConsultingEngineering (Iran), UltramagGeophysics (Australia), GPRLatinaamericana (Peru), Геологоразведочный институт Сан-Паулу (Бразилия), Геофизическое подразделение Геологоразведочного института Порто (Португалия), компания DeepGPR (Россия, с более чем двадцатилетним опытом).

Глубинность работ подтверждена опытно-методическими работами с последующей заверкой по данным каротажа скважин, места проведения работ представлены на рис. 7.

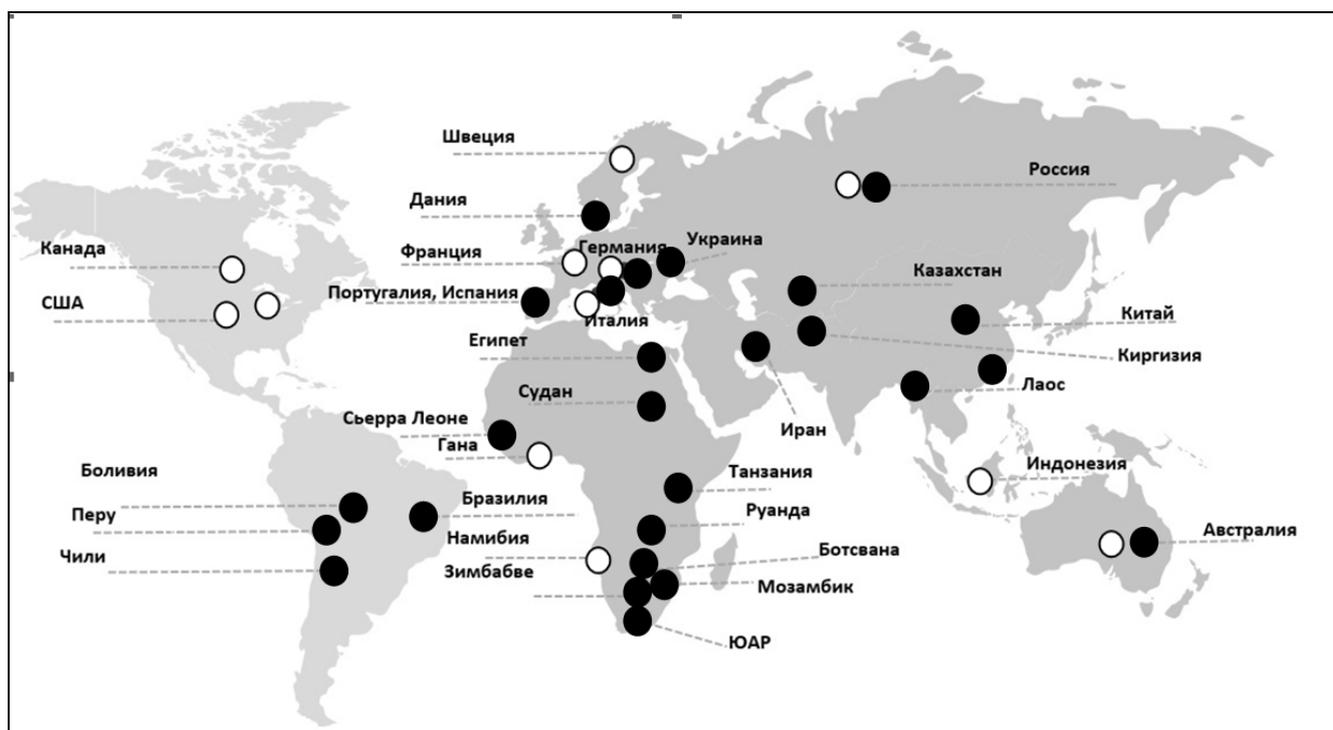


Рис. 7. Карта выполненных работ по всему миру: белые точки – зарубежные георадары; черные точки – российские георадары
Fig. 7. Map of completed works around the world: white dots are foreign ground-penetrating radars; black dots are Russian ground-penetrating radars

На рис. 8–12 приведены радарограммы, имеющие цветное амплитудно-фазовое структурное представление и полученные на российских георадарах, собранных по схеме передатчиков на высоковольтных разрядниках. Максимальная глубина до 200 м.

Практические примеры проведенных работ (рис. 8–12) демонстрируют достижение глубин георадиолокации 200 м и более в различных средах с разным погонным затуханием и на низких частотах с большой мощностью передатчиков, что хорошо согласуется с классической формулой радиолокации в свободном пространстве, учитывающей погонное затухание полупроводящих сред горных пород. Также стоит обратить внимание на повышение эффективности антенно-фидерных устройств, в современных радиолокационных станциях очень высокие коэффициенты усиления используемых антенн, а излучаемые мощности достигают десятков мегаватт.

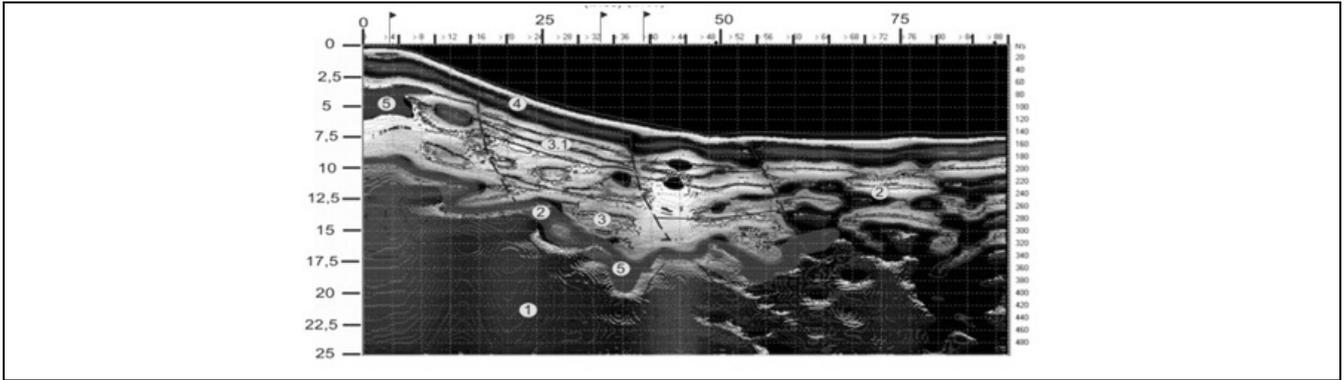


Рис. 8. Обследование оползневых склонов, картирование границ оползневых блоков, деформаций, поверхности скольжения, уровень грунтовых вод. Глины. Республика Казахстан 2014 г. Георадар ЛЮЗА. Глубина до 25 м

Fig. 8. Survey of landslide slopes, mapping of the boundaries of landslide blocks, deformations, sliding surfaces, groundwater level. Clay. Republic of Kazakhstan 2014. Ground-penetrating radar VINE. Depth up to 25 m

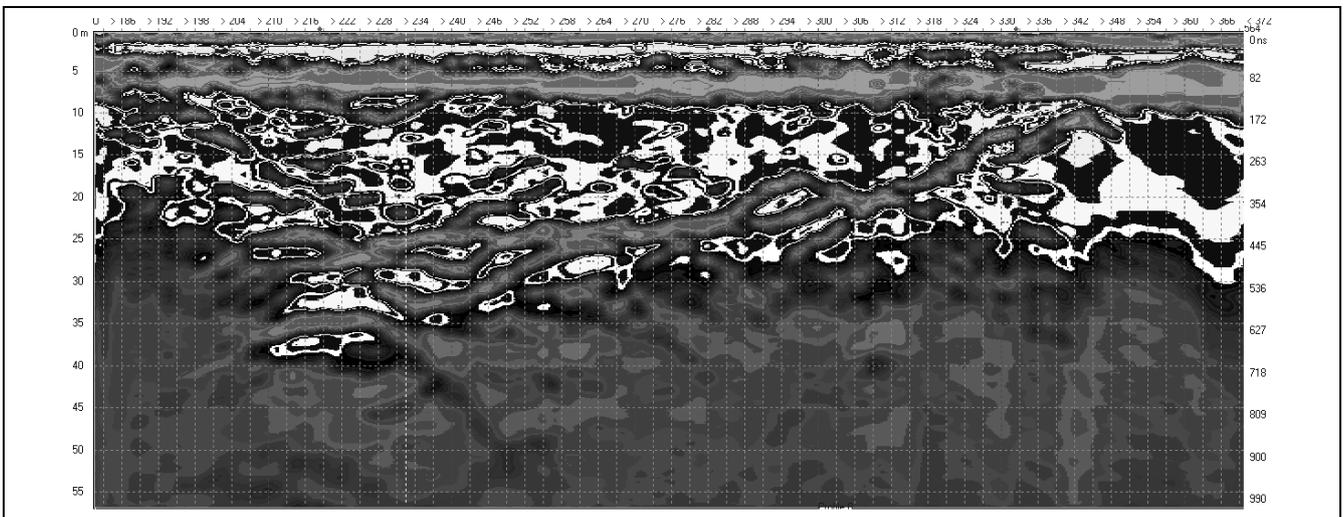


Рис. 9. Компания GPR. Кварц-жильное месторождение золота. Гранитоиды. Республика Тыва. Российская Федерация. Георадар Лоза. Глубина до 60 м

Fig. 9. The GPR company. Quartz is a vein-rich gold deposit. Granitoids. The Republic of Tyva. Russian Federation. Ground-penetrating radar Vine. Depth up to 60 m

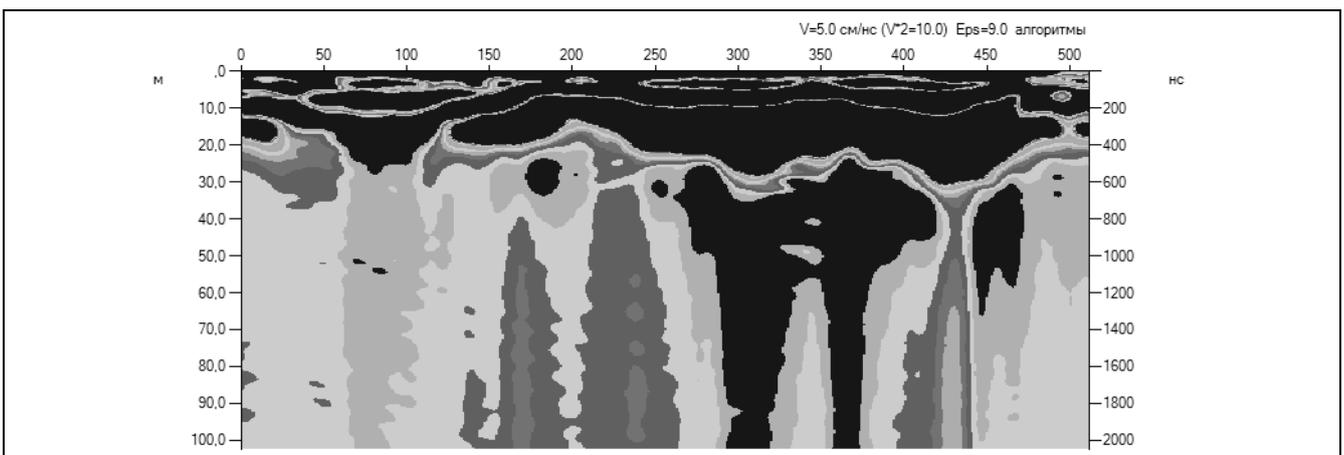


Рис. 10. Обследование участков развития карстовых процессов, определение границ развития карста, структурных неоднородностей. Известняки, карбонаты. Камахаре, Сан-Паулу, Бразилия 2020–2021 гг. Георадар ЛЮЗА. Глубина до 100 м

Fig. 10. Survey of karst process development sites, determination of karst development boundaries, and structural heterogeneities. Limestones, carbonates. Camohara, Sao Paulo, Brazil 2020–2021 Ground-penetrating radar VINE. Depth up to 100 m

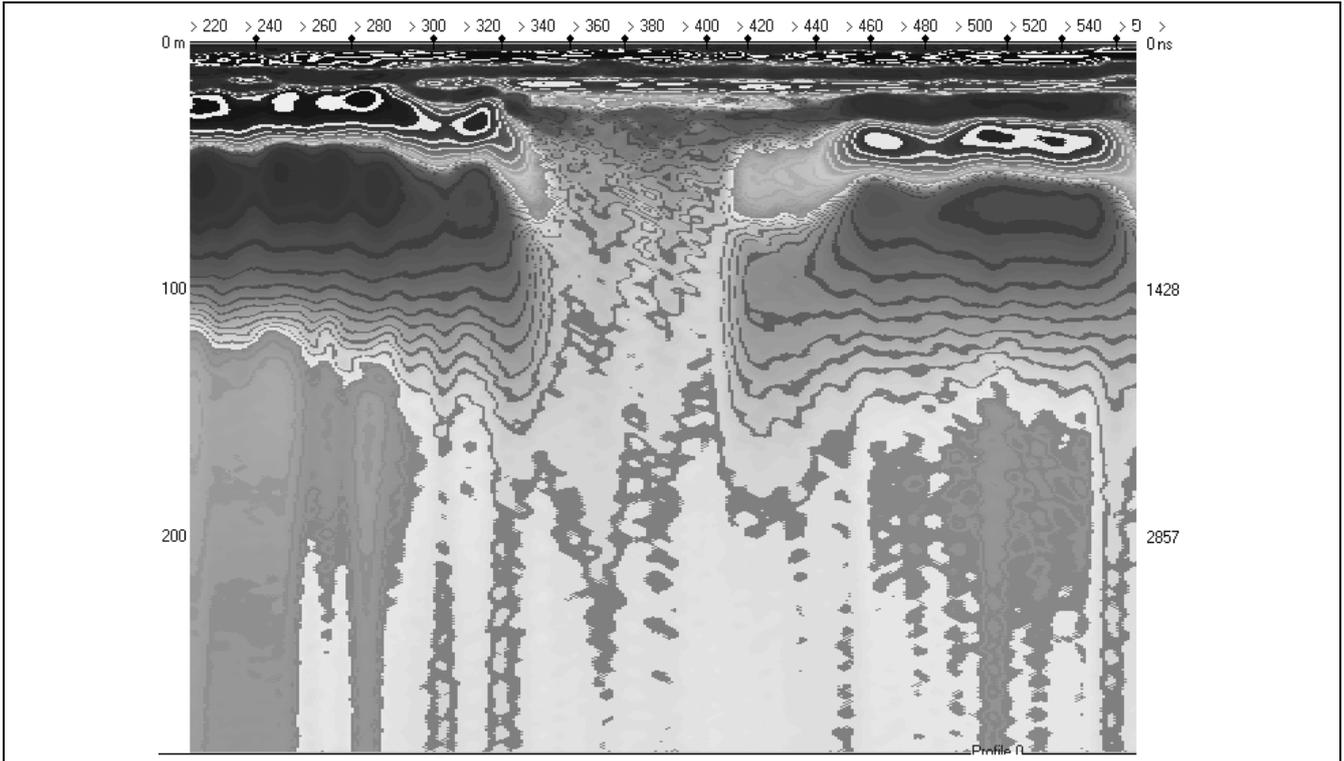


Рис. 11. Кимберлитовая трубка Амакинская. Карбонаты, кимберлиты. АЛРОСА. ОМР. Мирный, Российская Федерация. 2014 г. Георадар ЛОЗА. Глубина до 200 м

Fig. 11. The Amakinskaya kimberlite pipe. Carbonatites, kimberlites. ALROSA. OMR. Mirny, Russian Federation. 2014. Ground-penetrating radar LOZA. Depth up to 200 m

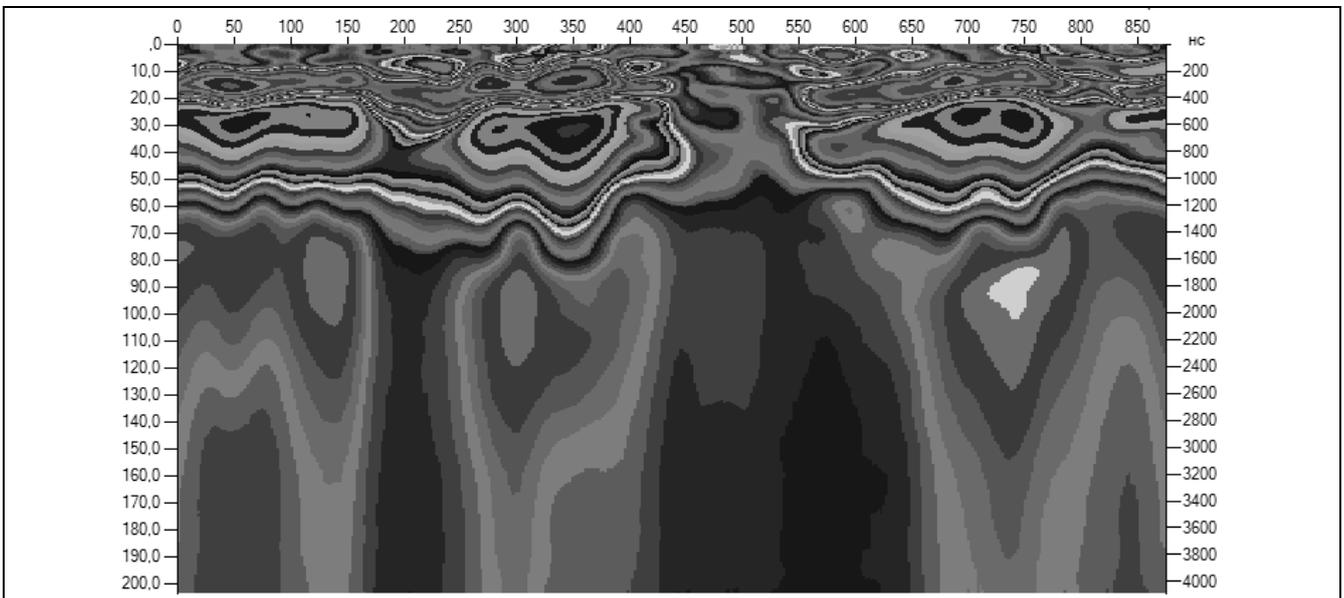


Рис. 12. Кимберлитовая трубка Пундур. Алевролиты. Сьерра Леоне. 2016 г. Георадар ЛОЗА. Глубина до 200 м

Fig. 12. Punduru kimberlite pipe. Siltstones. Sierra Leone. 2016. Ground-penetrating radar LOZA. Depth up to 200 m

Заключение

Представленные теоретические расчеты и их сравнение с результатами экспериментальных работ помогли произвести частотное разделение георадаров на высокочастотные (малоглубинные) и низкочастотные (глубинные), граница в районе 50–75 МГц. При этом как в расчетах, так и в результатах экспе-

риментов не обнаружено экспоненциального закона увеличения поглощения изучаемой среды. Это означает, что для увеличения глубины георадиолокации, необходимо увеличивать амплитуду излучаемого СШП-импульса.

Список источников

1. *Попов А.В., Прокопович И.В., Едемский Д.Е., Морозов П.А., Беркут А.И.* Глубинный георадар: принципы и применение // Электромагнитные волны и электронные системы. 2018. Т. 23. № 4. С. 28–36.
2. *Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Варенков В.В., Резников А.Е., Сахтеров В.И.* Современные георадары серии «ГРОТ» для экологического мониторинга // Экологические системы и приборы. 2012. № 5. С. 3–5.
3. Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) «ОКО-3». Универсальный базовый комплект. Техническое описание. Инструкция по эксплуатации. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.geotech.ru/images/georadary/teh_opisanie_na_oko3_ot_17-10-18.pdf?ysclid=mb9d8uih9g928069490, дата обращения 12.03.2025.
4. Geoscanners АВ. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.geoscanners.com/>, дата обращения 12.03.2025.
5. *Финкельштейн М.И.* Основы радиолокации. М.: Советское радио. 1973. 496 с.
6. Теоретические основы радиолокации / Под ред. *В.Е. Дулевича*. Изд. 2-е. М.: Советское радио. 1978. 607 с.
7. *Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П.* Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М.: Недра. 1986. 128 с.
8. *Аверин А.А., Антипов В.В., Горкин Д.С.* Способ сравнения параметров георадаров // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024. Т. 29. № 5. С. 71–75. DOI 10.18127/j15604128-202405-11.
9. *Горкин Д.С.* Сравнение георадаров Питон, Тритон, Грот, Лоза, Сфера // Тезисы XV науч.-технич. конф. «Радиолокационные системы малой и сверхмалой дальности». М.: ИЗМИРАН. 2024. С. 124–128.
10. *Баскаков С.И.* Основы электродинамики. М.: Советское радио. 1973. 248 с.
11. *Иванов А.А., Новиков П.В., Новиков К.В.* Электроразведка: учеб. пособие. М: МГРИ. 2022. 80 с.
12. *Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Резванов Р.А., Африкян А.Н.* Промысловая геофизика. М.: Недра. 1986. 342 с.
13. *Владов М.Л., Судакова М.С.* Георадиолокация: от физических основ до перспективных направлений: учеб. пособие. М.: ГЕОС. 2017. 240 с.
14. ООО «Компания ВНИИСМИ». [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.geo-radar.ru/articles/article5.php#1>, дата обращения 12.03.2025.
15. *Moorman B., Robinson S., Burgess M.* Imaging near-surface permafrost structure and characteristics with Ground-Penetrating Radar // Recorder. 2007. V. 32. № 2. P. 23–30.
16. Depth to Bedrock Survey | EARTHSCAN. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.earthscantech.com/project-1>, дата обращения 12.03.2025.
17. Lithium Pegmatites Exploration | Groundradar. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://groundradar.com/services/resource-exploration/lithium-pegmatites>, дата обращения 12.03.2025.
18. GPR Systems for Geophysics and Environmental Assessment. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.geophysical.com/wp-content/uploads/2019/12/GSSI-GPRforGeophysicsEA.pdf>, дата обращения 12.03.2025.
19. *Гулевич О.А., Волкомирская Л.Б., Варенков В.В., Резников А.Е., Тригубович Г.М., Чернышев А.В.* Изучение распределения проводимости в криолитозоне на основе данных метода отраженных электромагнитных волн (МОЭМВ) // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 9. DOI 10.30898/1684-1719.2021.9.6.
20. *Варенков В.В., Горкин Д.С., Смирнов Д.А., Сахтерова Т.В., Сахтеров В.И.* Результаты экспериментов с георадаром «Сфера» // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024. Т. 29. № 5. С. 66–70. DOI 10.18127/j15604128-202405-10.
21. Патент на полезную модель RUS218691 от 06.06.2023. Георадар для радиолокационного зондирования подстилающей поверхности / *Горкин Д.С., Варенков В.В., Сахтеров В.И.*
22. Патент на полезную модель RU219610U1 от 27.07.2023. Передатчик георадара / *Горкин Д.С., Сахтеров В.И.*

Информация об авторах

Александр Анатольевич Аверин – науч. сотрудник, заведующий сектором научного приборостроения

SPIN-код: 1995-8814

Вадим Валерьевич Антипов – к.т.н., науч. сотрудник

SPIN-код: 1685-6542

Дмитрий Сергеевич Горкин – науч. сотрудник

SPIN-код: 5641-7300

Владимир Васильевич Копейкин – к.ф.-м.н., ст. науч. сотрудник

SPIN-код: не представлен

Дмитрий Андреевич Смирнов – мл. науч. сотрудник

SPIN-код: 5161-7063

Александр Анатольевич Пивторак – вед. геолог

SPIN-код: не представлен

Владимир Иванович Сахтеров – к.ф.-м.н., ст. науч. сотрудник

SPIN-код: 7559-8325

Статья поступила в редакцию 30.04.2025

Одобрена после рецензирования 26.05.2025

Принята к публикации 02.06.2025

Evlovement of deep georadiolocation

**A.A. Averin¹, V.V. Antipov², D.S. Gorkin³, V.V. Kopeikin⁴,
D.A. Smirnov⁵, A.A. Pivtorak⁶, V.I. Sakhterov⁷**

^{1-5,7} Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS (Moscow, Russia)

⁶ Deep GPR Research (Saint Petersburg, Russia)

⁷ LLC "RL Radar in geophysics and radiophysics" (Moscow, Russia)

³ gorkin@izmiran.ru, ⁶ info@deep-gpr.com, ⁷ sakhterov@mail.ru

Abstract

In geophysics, in the electrical exploration section, the georadiolocation method of subsurface radiosounding, abbreviated as georadar, has become widespread over the past 45 years. This non-contact measurement method based on the propagation and reflection of electromagnetic waves has advantages over classical methods of electrical exploration, expanding the scope and detail of research. The non-contact method of measuring with ground-penetrating radar allows measurements to be carried out at a certain distance from the surface of the device. The fields of application and the depth of research of GPR radars from various manufacturers are shown. The theory of calculating the limiting depths of georadiolocation based on Maxwell's formulas related to the frequency and conductivity of rocks is presented, formulas are given and graphs are constructed indicating the convergence of calculations using the classical adapted radar formula for semi-conducting rocks. The calculations of the limiting depths were performed using the classical radar formula adapted for calculations in semi-conducting rocks with different linear attenuation, and graphs were constructed. The numerical values obtained are compared with the results of practical work confirming these calculations. Over the past 15 years, Russian manufacturers have made a breakthrough in the manufacture of low-frequency ground-penetrating radar with high-power transmitters based on domestic gas-filled arresters, significantly expanding the depth and scope of application in the search for minerals. Based on theoretical calculations and experimental data, the frequency is divided into classical high-frequency (shallow-depth) and low-frequency (deep-depth) ground-penetrating radars. The influence of the characteristics of various rocks on the results of subsurface radiosonde is shown.

Keywords

Georadiolocation, georadar, antenna, attenuation, pulse transmitter, semi-conducting media, rocks

For citation

Averin A.A., Antipov V.V., Gorkin D.S., Kopeikin V.V., Smirnov D.A., Pivtorak A.A., Sakhterov V.I. Evlovement of deep georadiolocation. *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2025. V. 30. № 3. P. 62–75. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202503-08> (in Russian)

References

1. Popov A.V., Prokopovich I.V., Edemsky D.E., Morozov P.A., Berkut A.I. Deep penetration subsurface radar: principles and application. *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2018. V. 23. № 4. P. 28–36. (in Russian)
2. Volkomirskaya L.B., Gulevich O.A., Varenkov V.V., Reznikov A.E., Sakhterov V.I. Modern GPR "Grot" series for environmental monitoring. *Ecological systems and devices*. 2012. № 5. P. 3–5. (in Russian)
3. Radio engineering instrument of subsurface sounding (georadar) "OKO-3". Universal basic kit. Technical description. User manual. [Electronic resource] – Access mode: https://www.geotech.ru/images/geographic/teh_opisanie_na_oko3_ot_17-10-18.pdf?ysclid=mb9d8uih9g928069490, date of reference 12.03.2025. (in Russian)
4. Geoscanners AB. [Electronic resource] – Access mode: <https://www.geoscanners.com/>, date of reference 12.03.2025.
5. Finkelstein M.I. *Fundamentals of radar*. Moscow: Soviet Radio. 1973. 496 p. (in Russian)
6. *Theoretical foundations of radar*. Ed. by V.E. Dulevich. Ed. 2. M.: Soviet Radio. 1978. 607 p. (in Russian)
7. Finkelstein M.I., Kutev V.A., Zolotarev V.P. *Application of radar subsurface sounding in engineering geology*. Moscow: Nedra. 1986. 128 p. (in Russian)
8. Averin A.A., Antipov V.V., Gorkin D.S. A method for comparing the parameters of GPR. *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2024. V. 29. № 5. P. 71–75. DOI 10.18127/j15604128-202405-11. (in Russian)
9. Gorkin D.S. Comparison of ground-penetrating radars Python, Triton, Grotto, Vine, Sphere. Abstracts of the XV Scientific and technical Conference "Short-range and ultra-short-range radar systems." Moscow: IZMIRAN. 2024. P. 124–128. (in Russian)
10. Baskakov S.I. *Fundamentals of electrodynamics*. Moscow: Sovetskoe radio. 1973. 248 p. (in Russian)
11. Ivanov A.A., Novikov P.V., Novikov K.V. *Electrical exploration: textbook*. Moscow: MGRI. 2022. 80 p. (in Russian)
12. Dobrynin V.M., Wendelstein B.Yu., Rezvanov R.A., Afrikyan A.N. *Commercial geophysics*. Moscow: Nedra. 1986. 342 p. (in Russian)
13. Vladov M.L., Sudakova M.S. *Georadiolocation: from the physical foundations to promising areas: textbook*. M.: GEOS. 2017. 240 p. (in Russian)
14. VNIISMI Company LLC. [Electronic resource] – Access mode: <https://www.geo-radar.ru/articles/article5.php#1>, date of reference 12.03.2025. (in Russian)
15. Moorman B., Robinson S., Burgess M. Imaging near-surface permafrost structure and characteristics with Ground-Penetrating Radar Recorder. 2007. V. 32. № 2. P. 23–30.
16. Depth to Bedrock Survey | EARTHSCAN. [Electronic resource] – Access mode: <https://www.earthscantech.com/project-1>, date of reference 12.03.2025.
17. Lithium Pegmatites Exploration | Groundradar. [Electronic resource] – Access mode: <https://groundradar.com/services/resource-exploration/lithium-pegmatites>, date of reference 12.03.2025.

18. GPR Systems for Geophysics and Environmental Assessment. [Electronic resource] – Access mode: <https://www.geophysical.com/wp-content/uploads/2019/12/GSSI-GPRforGeophysicsEA.pdf>, date of reference 12.03.2025.
19. Gulevich O.A., Volkovskaya L.B., Varenkov V.V., Reznikov A.E., Trigubovich G.M., Chernyshev A.V. Study of the electrical conductivity distribution in the cryolithozone based on the data of the method of reflected electromagnetic waves (MREW). Journal of Radio Electronics. 2021. № 9. DOI 10.30898/1684-1719.2021.9.6. (in Russian)
20. Varenkov V.V., Gorkin D.S., Smirnov A.D., Sahterova T.V., Sahterov V.I. The results of experiments with the GPR «Sphere». Electromagnetic waves and electronic systems. 2024. V. 29. № 5. P. 66–70. DOI 10.18127/j15604128-202405-10. (in Russian)
21. Utility model patent RUS218691 dated 06.06.20234. Georadar for radar sensing of the underlying surface. Gorkin D.S., Varenkov V.V., Sahterov V.I. (in Russian)
22. Utility model patent RU219610U1 dated 27.07.2023. Georadar transmitter. Gorkin D.S., Sahterov V.I. (in Russian)

Information about the authors

Alexander A. Averin – Research Scientist
Vadim V. Antipov – Ph.D. (Eng.), Research Scientist
Dmitry S. Gorkin – Research Scientist
Vladimir V. Kopeikin – Ph.D. (Phys.-Math.), Senior Research Scientist
Dmitiy A. Smirnov – Junior research Scientist
Aleksandr A. Pivtorak – Chief Geologist
Vladimir I. Sahterov – Ph.D. (Phys.-Math.), Senior Research Scientist

The article was submitted 30.04.2025

Approved after reviewing 26.05.2025

Accepted for publication 02.06.2025

ЖУРНАЛ «ДИНАМИКА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ - XXI ВЕК»

Главный редактор: докт. техн. наук, докт. экон. наук, профессор Павел Анатольевич Дроговоз

Международный научно-технический журнал, освещающий результаты научных исследований динамики процессов в сложных технических системах (радиотехника и электроника, физические системы, информатика и вычислительная техника, системы управления)

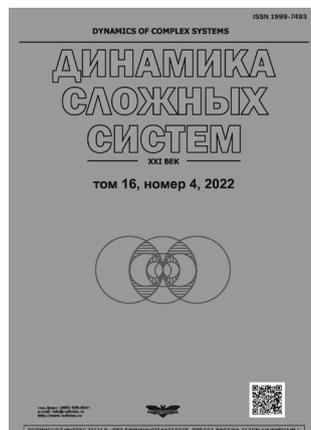
Включен в Перечень ВАК

Издаётся с 2011 г.

ISSN 1999-7493

Периодичность – 5 выпуска в год

«Пресса России» – индекс 71674



Научные специальности ВАК

- 1.2.1. Искусственный интеллект и машинное обучение
- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
- 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения
- 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами
- 2.3.4. Управление в организационных системах
- 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей
- 2.3.8. Информатика и информационные процессы
- 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы
- 5.2.2. Математические, статистические и инструментальные методы в экономике

Полный перечень журналов и книг, выпускаемых Издательством Радиотехника, размещен на сайте <http://www.radiotec.ru>

Адрес Издательства:

101000, г. Москва, Подсосенский пер., д. 14, стр. 2, тел. +7(495)625-92-41

<http://www.radiotec.ru>, e-mail: info@radiotec.ru