



СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-05-118>

УДК 53.072:551.553:621.37:551.34

**Модель годографа электромагнитных волн,
дифрагированных на локальном объекте при георадиолокационном изучении
слоев горных пород криолитозоны**К. О. Соколов   

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

 k.sokolov@ro.ru**Аннотация**

В георадиолокации одной из наиболее популярных процедур определения скорости распространения электромагнитных волн в массиве горных пород является подбор теоретических гиперболических годографов с последующим сравнением с годографом, полученным при георадиолокационном измерении. Эта процедура основана на модели однородной среды, но в настоящее время объектом изучения георадиолокации часто становятся неоднородные среды, такие как горизонтально-слоистые среды, характерные для рыхлых отложений криолитозоны. В статье представлены результаты исследования формирования гиперболических годографов георадиолокационных сигналов в горизонтально-слоистой среде без учета дисперсии и поглощения электромагнитных волн. На основе законов геометрической оптики выведены формулы, позволяющие рассчитать форму гиперболической оси синфазности георадиолокационных сигналов, отраженных от локального объекта в многослойном массиве мерзлых горных пород. На примере массива горных пород криолитозоны, содержащего слой незамерзших горных пород, показано влияние мощностей слоев горных пород и их относительной диэлектрической проницаемости на кажущуюся диэлектрическую проницаемость, получаемую в результате расчета теоретического гиперболического годографа. Также представлены условия, при которых невозможно определить наличие слоя незамерзших горных пород по гиперболическому годографу. Установленные закономерности апробированы на синтетических георадиолокационных радарограммах, рассчитанных в программе grgMax. Результаты теоретических исследований подтверждены сравнением с результатами анализа данных компьютерного моделирования георадиолокационных измерений в системе grgMax (относительная погрешность составила менее 0,5 %).

Ключевые слова

модель, массив, горные породы, диэлектрическая проницаемость, скорость, гипербола, слой, георадиолокация, криолитозона, grgMax

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0020, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800086-1).

Для цитирования

Sokolov K.O. Model of time-distance curve of electromagnetic waves diffracted on a local feature in the georadar study of permafrost zone rock layers. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):199–205. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-05-118>

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

**Model of time-distance curve of electromagnetic waves diffracted
on a local feature in the georadar study of permafrost zone rock layers**K. O. Sokolov   

N.V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russian Federation

 k.sokolov@ro.ru**Abstract**

In GPR (georadar) studies, one of the most popular procedures for determining electromagnetic waves propagation velocity in a rock mass is the selection of theoretical hyperbolic time-distance curves and subsequent comparison with the time-distance curve obtained from a GPR measurement. This procedure is based on the model of homogeneous medium, but nowadays the subject of GPR study is often inhomogeneous media, such as



horizontally layered media characteristic of loose permafrost zone sediments. The paper presents the findings of studying the formation of hyperbolic time-distance curves of georadar impulses in a horizontally layered medium without taking into account the dispersion and absorption of electromagnetic waves. On the basis of geometrical optics laws, formulas were derived to calculate the shape of the hyperbolic lineup of georadar impulses reflected from a local feature in a multilayer frozen rock mass. On the example of a permafrost zone rock mass containing a layer of unfrozen rocks, the effect of the thicknesses of rock layers and their relative dielectric permittivity on the apparent dielectric permittivity resulting from the calculation of the theoretical hyperbolic time-distance curve was shown. The conditions under which it is impossible to determine the presence of a layer of unfrozen rocks from a hyperbolic time-distance curve are also presented. The established regularities were tested on synthetic georadar radargrams calculated in the gprMax software program. The findings of the theoretical studies were confirmed by the comparison with the results of the analysis of the georadar measurements computer simulation data in the gprMax system (the relative error was less than 0.5%).

Keywords

model, rock mass, rocks, dielectric permittivity, velocity, hyperbola, layer, georadar, permafrost zone, gprMax

Acknowledgments

The study was performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. 0297-2021-0020, EGISU NIOKTR (Unified State Information System for R&D Accounting) No. 122011800086-1).

For citation

Sokolov K.O. Model of time-distance curve of electromagnetic waves diffracted on a local feature in the georadar study of permafrost zone rock layers. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):199–205. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-05-118>

Введение

Одной из геофизических задач, решаемых с привлечением метода георадиолокации, является исследование физико-механических свойств горных пород. Однако накопление экспериментальных материалов и развитие методического обеспечения георадиолокации в данном направлении происходит существенно медленнее [1, 2], чем в других [3], что приводит к недооценке возможностей метода георадиолокации. Причины, приведшие к такому положению дел в георадиолокации, могут быть различные, одной из них является некорректное использование процедуры определения скорости v распространения электромагнитных волн (ЭМВ) по гиперболическим годографам (осям синфазности георадиолокационных сигналов). Данная процедура является наиболее распространенным способом оценки скорости ЭМВ [1], по результатам выполнения которой рассчитывается вещественная часть относительной комплексной диэлектрической проницаемости ϵ' , зависящая от влажности, плотности и криогенного состояния горных пород [4]. В учебных пособиях как отечественных [1, 2], так и зарубежных [5, 6], а также в руководствах по обработке данных производителей георадаров (GSSI, GEOTEX) и стандарте American Society for Testing and Materials (ASTM)¹ обоснование применения определения скорости распространения ЭМВ по гиперболическим годографам приводится для случая, когда вмещающая среда является однородной.

В настоящее время в практике георадиолокационных измерений [3, 7, 8], а также в научных работах, посвященных автоматизации поиска гиперболических годографов в данных георадиолокации [9–11], в том

числе в режиме реального времени [12], объектом исследования является, как правило, неоднородная среда. Вследствие этого скорость распространения ЭМВ, определенная по гиперболе, находящейся в некотором слое, является усредненной (интегральной) характеристикой всех вышележащих слоев, о чем упомянуто в работе одного из классиков георадиолокации [13]. При проведении георадиолокационных исследований в области криолитозоны возможна неверная оценка криогенного состояния горных пород и, соответственно, их физико-механических свойств, в случае наличия слоя незамерзших горных пород, влияние которого на форму гиперболического годографа может быть хотя и значительным, но недостаточным для того, чтобы результат определения v по методу аппроксимации годографа гиперболой [2] оказался в диапазоне значений, характерных для талых пород. Таким образом, в многослойной среде непосредственно по гиперболическому годографу возможно определить истинную скорость v распространения ЭМВ только в первом слое горных пород, и для корректного использования значений v в практике ведения георадиолокационных работ необходимо установить закономерности формирования в слоистых породных массивах годографов ЭМВ, дифрагированных на локальном объекте. Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать модель гиперболического годографа сигналов, получаемых при изучении слоистого породного массива;

- установить зависимость v и ϵ' , определяемых по гиперболическому годографу, от значений v и ϵ' вышележащих слоев;

- определить влияние незамерзшего слоя в массиве мерзлых горных пород на значение v , рассчитываемое по гиперболическому годографу;

- проверить адекватность полученных теоретических результатов на данных компьютерного моделирования.

¹ ASTM D6432-11, Standard guide for using the surface ground penetrating radar method for subsurface investigation, ASTM International, West Conshohocken, PA; 2011. <https://doi.org/10.1520/D6432-11>

Модель гиперболического годографа георадиолокационных сигналов, получаемых при зондировании слоистого породного массива

ЭМВ, излучаемая георадаром, расположенном в точке x , распространяется в слоистом породном массиве по принципу Ферма (серая сплошная линия на рис. 1), но в данной работе рассмотрим модель распространения ЭМВ по лучу (черная пунктирная линия на рис. 1) в массиве, состоящем из n слоев мощностью h_i с заданными значениями ϵ'_i и v_i , при i , находящемся в диапазоне от 1 до n . Локальный объект, обозначенный черным кружком на рис. 1, расположен в последнем слое на глубине h_0 . Расстояние h_n , пройденное лучом от георадара до локального объекта, будет равно:

$$h_n = \sqrt{(x - x_0)^2 + h_0^2}.$$

При перемещении георадара вдоль профиля координата x будет увеличиваться, а h_n соответственно уменьшаться, формируя левую ветвь гиперболы и достигая минимума в точке $x = x_0$, в которой и будет расположена вершина гиперболы. При $x > x_0$ значения h_n будут увеличиваться и соответствовать правой ветви гиперболы. В промежуточном слое под номером i луч проходит расстояние h_{ni} , которое больше мощности слоя h_i во всех точках, кроме x_0 :

$$h_{ni} = \frac{h_i}{\cos \alpha}, \quad i \in 1 \dots (n-1),$$

где

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{x - x_0}{h_n} \right).$$

Так как в последнем слое луч проходит расстояние меньшее, чем h_n , то h_{nn} будет равно:

$$h_{nn} = \frac{h_0 - \sum_{i=1}^{n-1} h_i}{\cos \alpha}.$$

Время распространения луча в слое i :

$$t_{ni} = \frac{h_{ni}}{v_i}.$$

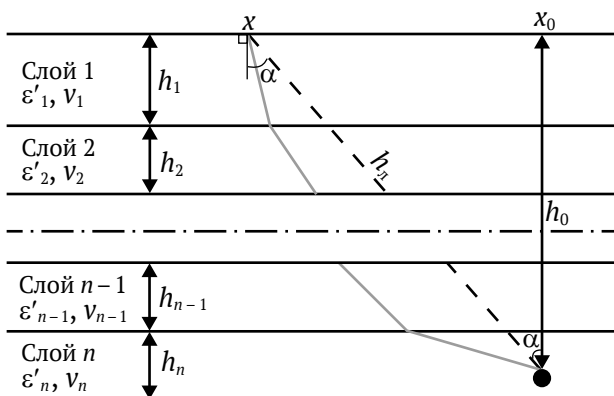


Рис. 1. Схема модели распространения электромагнитной волны в слоистом породном массиве

Общее время t_n распространения луча от георадара до локального объекта составит:

$$t_n = \sum_{i=1}^n t_{ni}.$$

Тогда усредненная лучевая скорость будет равна:

$$v_n = \frac{\sum_{i=1}^n h_{ni}}{t_n}.$$

Уравнение гиперболического годографа в одно-родной среде [2]:

$$t = \frac{2h_n}{v}. \quad (1)$$

Для горизонтально-слоистой среды уравнение (1) примет следующий вид:

$$t = \frac{2 \sum_{i=1}^n h_{ni}}{v_i} = \frac{2 \sum_{i=1}^n h_i}{v_i \cos \alpha} = \frac{2 \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}}{\cos \left(\arcsin \frac{x - x_0}{h_n} \right)}.$$

Исходя из основного тригонометрического тождества и положительности функции косинуса в области значений арксинуса преобразуем знаменатель дроби:

$$\cos \left(\arcsin \frac{x - x_0}{h_n} \right) = \sqrt{1 - \left(\frac{x - x_0}{h_n} \right)^2} = \frac{\sqrt{h_n^2 - (x - x_0)^2}}{h_n} = \frac{h_0}{h_n}.$$

Тогда уравнение гиперболического годографа георадиолокационных сигналов, отраженных от локального объекта, расположенного в слоистом породном массиве, может быть представлено в виде (2). При подстановке в уравнение (2) параметров для одно-лойной среды оно совпадает с выражением (1):

$$t = \frac{2h_n}{h_0} \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}. \quad (2)$$

При обработке данных георадиолокации гиперболический годограф, имеющий форму, соответствующую выражению (2), аппроксимируют гиперболой, имеющей вид согласно уравнению (1). Рассчитываемые в результате подобной аппроксимации значения скорости распространения ЭМВ являются не истинными, а кажущимися ($v_{\text{каж}}$), и представляют собой некоторое интегральное значение скоростей ЭМВ во всех вышележащих слоях. Для определения зависимости $v_{\text{каж}}$ от значений v в слоях, перекрывающих локальный объект, приравняем друг к другу уравнения (1) и (2):

$$\frac{2h_n}{v_{\text{каж}}} = \frac{2h_n}{h_0} \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}.$$

И выразим $v_{\text{каж}}$:

$$v_{\text{каж}} = \frac{h_0}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}}. \quad (3)$$



И в соответствии с известной зависимостью $v = c/\sqrt{\varepsilon'}$ ($c = 300\,000$ км/с $= 0,3$ м/нс) [2] кажущаяся диэлектрическая проницаемость будет равна:

$$\varepsilon'_{\text{каж}} = \frac{c^2}{h_0^2} \left(\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i} \right)^2. \quad (4)$$

По значению $v_{\text{каж}}$ невозможно оценить скорость распространения ЭМВ в горных породах конкретного слоя и может возникнуть предположение, что v каждого слоя находится в диапазоне $v_{\text{каж}} \pm \Delta v$. Например, если при проведении георадиолокационных измерений массива многолетнемерзлых горных пород, у которых v находится в узком диапазоне 100–150 м/мкс (среднее значение $v_{\text{ср}} \approx 125$ м/мкс) [14], $v_{\text{каж}}$ будет выше 100 м/мкс, то в целом массив можно охарактеризовать как мерзлый. Однако в подобных массивах может находиться слой пород в талом состоянии, который может быть зафиксирован по данным георадиолокации, но существует проблема с его распознаванием [15], в связи с этим возникает проблема определения влияния слоя пород с низким значением $v_{\text{с}}$ на $v_{\text{каж}}$.

Для решения данной проблемы воспользуемся формулой (3) и тем фактом, что v мерзлых горных пород варьируется в узких пределах, а скорость $v_{\text{т}}$ распространения ЭМВ в незамерзших горных породах значительно ниже [2]. Часть массива горных пород, находящуюся в мерзлом состоянии, представим в виде слоев одинаковой толщины $h_{\text{с}}$, в каждом из которых скорость распространения ЭМВ будет равна усредненному значению $v_{\text{с}}$. Разбивать мерзлую часть массива горных пород на слои можно произвольно, так как при одинаковой v их количество и толщина не влияют на время регистрации георадиолокационных сигналов, составляющих гиперболическую ось синфазности. Толщину $h_{\text{т}}$ и скорость $v_{\text{т}}$ в слое талых пород представим пропорциональными $h_{\text{с}}$ и $v_{\text{с}}$:

$$h_{\text{т}} = k_h h_{\text{с}}, \quad v_{\text{т}} = k_v v_{\text{с}}.$$

После подстановки в (3) получим выражение для кажущейся скорости $v_{\text{каж.т}}$ распространения ЭМВ в массиве мерзлых горных пород, содержащем слой пород в талом состоянии:

$$\begin{aligned} v_{\text{каж.т}} &= \frac{h_0}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}} = \frac{h_{\text{с}}(n-1) + k_h h_{\text{с}}}{\frac{h_{\text{с}}}{v_{\text{с}}}(n-1) + \frac{h_{\text{с}} k_h}{v_{\text{с}} k_v}} = \\ &= \frac{h_{\text{с}}(n-1+k_h)}{\frac{h_{\text{с}}}{v_{\text{с}}} \left(n-1 + \frac{k_h}{k_v} \right)} = \frac{v_{\text{с}}(n-1+k_h)}{\left(n-1 + \frac{k_h}{k_v} \right)}. \end{aligned} \quad (5)$$

При $k_h = 0$ по формуле (5) $v_{\text{каж.т}} = v_{\text{с}}$, т.е. будет соответствовать мерзлоте массиву горных пород. Для того чтобы определить, как изменится $v_{\text{каж}}$ по сравнению с $v_{\text{с}}$ при наличии низкоскоростного слоя талых пород, разделим формулу (3) с параметрами мерзлых пород $h_{\text{с}}$ и $v_{\text{с}}$ для всех слоев, обозначив ее $v_{\text{каж.м}}$, на выражение (5):

$$\frac{v_{\text{каж.м}}}{v_{\text{каж.т}}} = \frac{h_0}{n \frac{h_{\text{с}}}{v_{\text{с}}}} \frac{\left(n-1 + \frac{k_h}{k_v} \right)}{v(n-1+k_h)} = \frac{n-1 + \frac{k_h}{k_v}}{n-1+k_h}. \quad (6)$$

Проверка полученных теоретических выражений на данных компьютерного моделирования

Моделирование данных георадиолокации проведено в системе gprMax [16], которая положительно зарекомендовала себя в исследованиях, посвященных определению и анализу гиперболических осей синфазности георадиолокационных сигналов [17–19]. При моделировании использовались следующие параметры: зондирующий сигнал – импульс Рикера с центральной частотой Фурье-спектра 400 МГц, временная развертка – 150, база антенны – 0 мм. Данные для моделирования представлены в таблице.

Текст входного файла для gprMax для модели №1:

```
#domain: 4 9.1 0.002
#dx dy dz: 0.002 0.002 0.002
#time_window: 150e-9
#material: 6 0 1 0 sloi1
#material: 4 0 1 0 sloi2
#waveform: ricker 10 0.4e9 my_ricker
#hertzian_dipole: z 0.1 9 0 my_ricker
#rx: 0.1 9 0
#src_steps: 0.01 0 0
#rx_steps: 0.01 0 0
#box: 0 0 0 4 9 0.002 sloi1
#box: 0 0 0 4 7 0.002 sloi2
#cylinder: 2 5 0 2 5 0.002 0.01 pec
```

Результат моделирования (out-файл) экспортирован в формат программы GeoScan32 (производитель НПЦ ГЕОТЕХ), в которой затем установлены начало отсчета шкалы глубин и параметр База антенны, равный 1. На рис. 2, а представлены результаты моделирования (Модель №1), значения $\varepsilon'_{\text{каж}}$, рассчитанной с помощью процедуры «Гипербола», и $v_{\text{каж}}$. Время регистрации сигналов, отраженных от нижней границы 1 слоя t_1 и от локального объекта – вершины гиперболы $t_{\text{т}}$, в соответствии с формулой (1) равно:

$$t_1 = 32,7 \text{ нс}, \quad t_{\text{т}} = t_1 + 26,7 = 59,4 \text{ нс}.$$

Таблица

Параметры моделей массива горных пород

№ модели	Количество слоев	Мощность слоев, м	ε'	v , м/мкс	h_0 , м
1	2	2; 7	6; 4	122,5; 150	4
2	3	2; 2; 4	8; 6; 4	100; 122,5; 150	6
3	5	1; 1; 1; 0,5; 2	6; 4; 6; 20; 4	122,5; 150; 122,5; 67; 150	4,5



По формулам (3) и (4) $v_{\text{каж}}$ и $\varepsilon'_{\text{каж}}$ будут равны:

$$v_{\text{каж}} = 0,1349 \text{ м/нс} = 134,9 \text{ м/мкс};$$

$$\varepsilon'_{\text{каж}} = 4,9484.$$

Проверка полученных значений:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'}} = 0,1349 \text{ м/нс}.$$

Таким образом, относительная погрешность значений $v_{\text{каж}}$ и $\varepsilon'_{\text{каж}}$ рассчитанных в программе GeoScan32, составила 0,07 и 0,37% соответственно. Для модели №2 в результате вычислений по формулам (3) и (4) получены значения $v_{\text{каж}} = 123,7 \text{ м/мкс}$, $\varepsilon'_{\text{каж}} = 5,8853$.

Для проверки формулы (6) сначала проведем вычисления $v_{\text{каж.м}}$ для модели массива мерзлых горных пород мощностью $h_0 = 5 \text{ м}$, состоящей из $n = 5$ слоев с $h = 1 \text{ м}$, $v = 122,5, 150, 122,5, 134,2, 150 \text{ м/мкс}$ и $\varepsilon' = 6; 4; 6; 5; 4$. Согласно выражению (3) $v_{\text{каж.м}} = 134,7 \text{ м/мкс}$.

Далее вместо четвертого слоя введем низкоскоростной слой (модель №3 в таблице) с такими параметрами $h_{\text{т}}$, $v_{\text{т}}$, чтобы значение $v_{\text{каж.т}}$ находилось в диапазоне, характерном для мерзлых горных пород. Установим мощность незамерзшего слоя $h_{\text{т}} = 0,5 \text{ м}$ (при этом h_0 уменьшится до 4,5 м) как половину ($k_h = 0,5$) мощности усредненного слоя $h_{\text{с}} = 1 \text{ м}$, а скорость распространения ЭМВ в нем в два раза меньше ($k_v = 0,5$), чем среднее значение $\varepsilon'_{\text{с}} = 5$, $v_{\text{с}} = 134,2 \text{ м/мкс}$, т.е. $v_{\text{т}} = 67,1 \text{ м/мкс}$, $\varepsilon'_{\text{т}} = (c/v_{\text{т}})^2 = 20$. Остальные параметры моделируемого массива горных пород представлены в таблице. По формуле (3) $v_{\text{каж.т}} = 121,2 \text{ м/мкс}$, что подтверждается результатом вычисления $v_{\text{каж}}$ по данным компьютерного моделирования (рис. 2, в), относительная погрешность которого, по сравнению с точным значением, составила менее 0,5%.

Теперь можно рассчитать, как изменилась кажущаяся скорость распространения ЭМВ в модели массива горных пород с введением в нее низкоскоростного слоя:

$$\frac{v_{\text{каж.м}}}{v_{\text{каж.т}}} = 1,1114.$$

То есть при наличии низкоскоростного слоя с указанными выше параметрами $v_{\text{каж}}$ уменьшается на $\approx 10\%$. Для получения данного результата пришлось провести весь комплекс расчетов по вычислению $v_{\text{каж}}$ как для полностью мерзлого массива горных пород, так и для случая со слоем незамерзших пород. Подобные расчеты можно существенно упростить, если использовать формулу (6), позволяющую с точностью до тысячных получить тот же результат:

$$\frac{v_{\text{каж.м}}}{v_{\text{каж.т}}} = \frac{n-1 + \frac{k_h}{k_v}}{n-1 + k_h} = 1,1111.$$

Для подтверждения того, что формула (6) верна при разбиении мерзлой части массива горных пород на произвольное количество слоев, проведены расчеты для модели с 3 и 9 слоями. При этом будет изменяться только один параметр – k_h , так, при $n = 3$ ($h = 2, 0,5, 2 \text{ м}$) $k_h = 0,25$, при $n = 9$ (мощность всех слоев – $0,5 \text{ м}$) $k_h = 1$:

$$n = 3 \rightarrow \frac{v_{\text{каж.м}}}{v_{\text{каж.т}}} = 1,1111;$$

$$n = 9 \rightarrow \frac{v_{\text{каж.м}}}{v_{\text{каж.т}}} = 1,1111.$$

В общем случае, чтобы определить, будет ли $v_{\text{каж.т}}$ находиться в диапазоне значений, характерных для мерзлых пород, например, Центральной Якутии, при произвольных k_h , k_v в формулу (5) подставим усредненные значения, характерные для этого района, $v_{\text{с}} = 125 \text{ м/мкс}$ и $v_{\text{каж.т}} = 100 \text{ м/мкс}$ [14], тогда при весьма значительной разнице между $v_{\text{каж.м}}$ и $v_{\text{каж.т}}$:

$$\frac{v_{\text{каж.м}}}{v_{\text{каж.т}}} = 1,25$$

получим из (5):

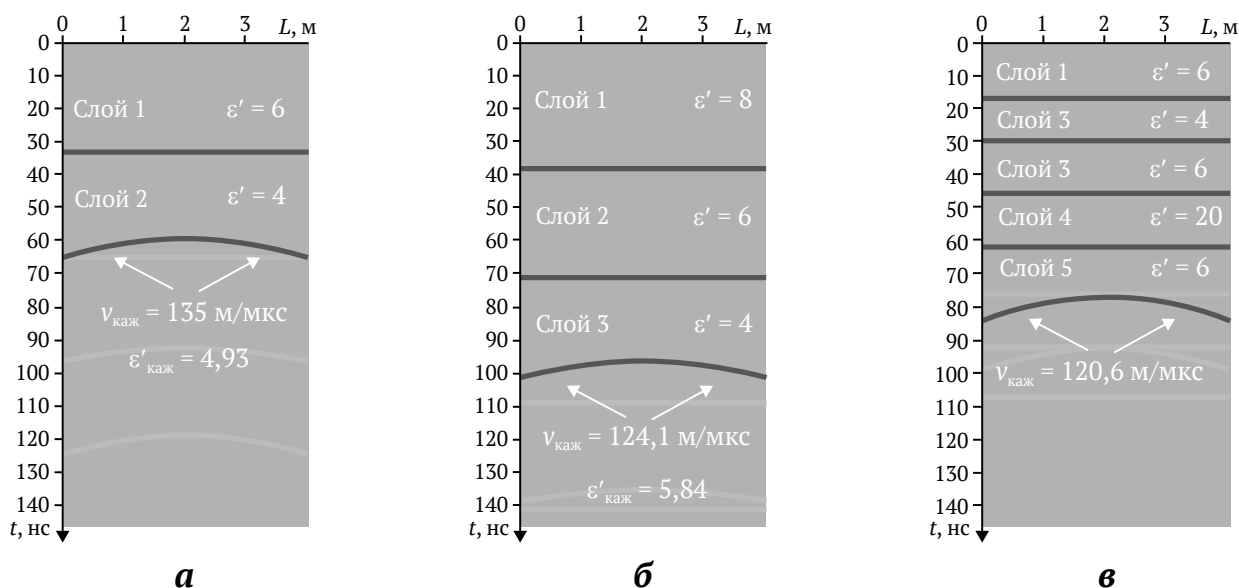


Рис. 2. Синтетические радарограммы моделей 1 (а), 2 (б) и 3 (в)



$$100 = \frac{125(n-1+k_h)}{n-1+\frac{k_h}{k_v}},$$

откуда

$$\frac{n-1+k_h}{n-1+\frac{k_h}{k_v}} = 0,8. \quad (7)$$

При увеличении $v_{\text{каж.т}}$ или уменьшении $v_{\text{каж.м}}$ выражение (7) будет больше 0,8, а соотношение $v_{\text{каж.м}}/v_{\text{каж.т}}$ будет уменьшаться, что приведет к затруднениям при интерпретации данных георадиолокационных измерений по определению наличия слоя незамерзших горных пород на основе анализа гиперболического годографа георадиолокационных сигналов. Оценка возможности выявления слоя незамерзших горных пород, в зависимости от величин параметров k_h , k_v по формуле (7), сделана для района Центральной Якутии, для других районов ее необходимо пересчитать с соответствующими значениями скоростей распространения ЭМВ в мерзлых и талых горных породах.

Выводы

В результате проведенного исследования разработана модель гиперболического годографа георадиолокационных сигналов, отраженных от локального объекта, расположенного в массиве горных пород,

с произвольным количеством слоев. На основе разработанной модели получены выражения для кажущихся значений скорости распространения электромагнитных волн и вещественной части относительной комплексной диэлектрической проницаемости рассчитываемых по гиперболическому годографу георадиолокационных сигналов. Полученные выражения позволили установить, как снизится скорость распространения электромагнитных волн в массиве горных пород, содержащем слой незамерзших горных пород, по сравнению с полностью мерзлым массивом. Результаты теоретических исследований подтверждены сравнением с результатами анализа данных компьютерного моделирования георадиолокационных измерений в системе gprMax (относительная погрешность составила менее 0,5 %).

Полученные в ходе исследования результаты имеют большое значение для развития методического обеспечения георадиолокации по определению электрофизических свойств горных пород, что повысит достоверность оценки их физико-механических свойств, особенно в области распространения вечной мерзлоты. Практическое применение полученных результатов в исследованиях, направленных на автоматизированное определение электрофизических свойств горных пород и грунтов по гиперболическим годографам, позволит сформировать базу данных с актуальной информацией о диэлектрической проницаемости горных пород.

Список литературы / References

1. Старовойтов А.В. *Интерпретация георадиолокационных данных*. М.: Изд-во МГУ; 2008. 192 с. Starovoitov A.V. *Interpretation of georadar data*. Moscow: MSU Publ. House; 2008. 192 p. (In Russ.)
2. Владов М.Л., Судакowa М.С. Георадиолокация. *От физических основ до перспективных направлений*. М.: Изд-во ГЕОС; 2017. 240 с. Vladov M.L., Sudakova M.S. *Georadar. From physical fundamentals to upcoming trends*. Moscow: GEOS Publ. House; 2017. 240 p. (In Russ.)
3. Lombardi F., Podd F., Solla M. From its core to the niche: insights from GPR applications. *Remote Sens.* 2022;14(13):3033. <https://doi.org/10.3390/rs14133033>
4. Фролов А.Д. *Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов*. Пушчино: ОНТИ ПНЦ РАН; 1998. 515 с. Frolov A.D. *Electrical and elastic properties of frozen rocks and ice*. Pushchino: ONTI PNTs RAS Publ.; 1998. 515 p. (In Russ.)
5. Persico R. *Introduction to ground penetrating radar: inverse scattering and data processing*. New Jersey: Wiley-IEEE Press; 2014. 392 с. <https://doi.org/10.1002/9781118835647.ch2>
6. Jol H.M. *Ground penetrating radar: theory and application*. Elsevier; 2008. 544 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.X0001-4>
7. Дьяков А.Ю., Калашник А.И. *Методические основы георадарных исследований горнотехнических объектов*. Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН; 2021. 110 с. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.443.3> Dyakov A.Yu., Kalashnik A.I. *Methodological fundamentals of GPR studies of mining features*. Apatity: FITs KSC RAS Publ.; 2021. 110 p. (In Russ.) <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.443.3>
8. Solla M., Perez-Gracia V., Fontul S. A review of GPR application on transport infrastructures: troubleshooting and best practices. *Remote Sens.* 2021;13(4):672. <https://doi.org/10.3390/rs13040672>
9. Wunderlich T., Wilken D., Majchczack B.S. et al. Hyperbola detection with retinanet and comparison of hyperbola fitting methods in GPR data from an archaeological site. *Remote Sensing.* 2022;14:3665. <https://doi.org/10.3390/rs14153665>
10. Mertens L., Persico R., Matera L., Lambot S. Automated detection of reflection hyperbolas in complex gpr images with no a priori knowledge on the medium. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2016;1:580–596. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2462727>



11. Lei W., Hou F., Xi J. et al. Automatic hyperbola detection and fitting in GPR B-scan image. *Automation in Construction*. 2019;106:102839. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102839>
12. Dou Q., Wei L., Magee R., Cohn A.G. Real-time hyperbola recognition and fitting in GPR data. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2017;55(1):51–62. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2592679>
13. Daniels J.J. Fundamentals of ground penetrating radar. In: *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. 1989;1:62–142. <https://doi.org/10.4133/1.2921864>
14. Омеляненко А.В., Федорова Л.Л. Георадиолокационные исследования многолетнемерзлых пород. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН; 2006. 136 с.
Omelyanenko A.V., Fedorova L.L. Georadar studies of permafrost. Yakutsk: YaSC SB RAS Publ.; 2006. 136 p. (In Russ.)
15. Якупов В.С. Геофизика криолитозоны. Якутск: Изд-во Якутского госуниверситета; 2008. 342 с.
Yakupov V.S. *Geophysics of permafrost zone*. Yakutsk: Yakutsk State University Publ.; 2008. 342 p. (In Russ.)
16. Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I. gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. *Computer Physics Communications*. 2016;209:163–170. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2016.08.020>
17. Wunderlich T., Wilken D., Majchczack B.S., et al. Hyperbola detection with RetinaNet and comparison of hyperbola fitting methods in GPR data from an archaeological site. *Remote Sensing*. 2022;14:3665. <https://doi.org/10.3390/rs14153665>
18. Dewantara D., Parnadi W.W. Automatic hyperbola detection and apex extraction using convolutional neural network on GPR data. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;1:012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2243/1/012027>
19. Wang H., Ouyang S., Liao K.-F., Jin L.-N. GPR B-SCAN image hyperbola detection method based on deep learning. *Acta Electronica Sinica*. 2021;49(5):953–963. <https://doi.org/10.12263/DZXB.20200635>

Информация об авторе

Кирилл Олегович Соколов – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории георадиолокации, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-4179-9619](https://orcid.org/0000-0002-4179-9619), Scopus ID [56457950500](https://scopus.org/56457950500), ResearcherID [P-8843-2016](https://orcid.org/P-8843-2016); e-mail k.sokolov@ro.ru

Information about the author

Kirill O. Sokolov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, N.V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russian Federation; ORCID [0000-0002-4179-9619](https://orcid.org/0000-0002-4179-9619), Scopus ID [56457950500](https://scopus.org/56457950500), ResearcherID [P-8843-2016](https://orcid.org/P-8843-2016); e-mail k.sokolov@ro.ru

Поступила в редакцию 11.05.2023
Поступила после рецензирования 08.03.2024
Принята к публикации 22.05.2024

Received 11.05.2023
Revised 08.03.2024
Accepted 04.05.2024