

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра геофизики

**«Определение мощности торфа на линейных объектах с помощью  
метода радиолокационного профилирования»**

**АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ**

Студента 2 курса 261 группы  
направление 05.04.01 геология  
геологического ф-та  
Павленко Кирилла Викторовича

**Научный руководитель**

Д. ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_

В.П.Губатенко

подпись, дата

**Зав. кафедрой**

К. г.- м.н., доцент

\_\_\_\_\_

Е.Н. Волкова

подпись, дата

Саратов 2019

**Введение.** Материалы для магистерской работы были собраны в ОАО «Сургутнефтегаз» «СургутНИПИнефть» в г. Сургут ХМАО Тюменской области во время прохождения производственной практики в 2016 году.

Основной целью магистерской работы является определение мощности торфа методом радиолокационного профилирования на проектируемых автодорогах и нефтепроводах ОАО «Сургутнефтегаз», а также изучение глубинности радиоволнового метода.

Для выполнения этой цели поставлены следующие задачи:

1. Выполнить радиолокационное профилирование на выделенном участке работ.
2. Обработать результаты радиолокационного профилирования.
3. Построить сводный георадарный разрез, согласованный с результатами ручного бурения.
4. С учетом токов смещения рассчитать напряженность электрического поля и производную по времени магнитной индукции в однородном полупространстве, ограниченном идеальным проводником.
5. Сформулировать критерии глубинности радиолокационного метода.
6. По результатам расчетов определить максимальную глубину исследования радиолокационного метода для различных значений параметров полупространства.

**Основное содержание работы.** Магистерская работа посвящена применению георадарного метода на линейных объектах в Сургутском районе.

В разделе 1 «Геолого-геофизическая характеристика района», данной работы описаны геоморфологическое строение изучаемого района, техногенные процессы на участке работ и климатические условия.

В разделе 2 «Теория георадарного метода», рассмотрены физико-математическое обоснование георадарного метода, условия расщепления годографа в диспергирующих средах, возможность определения

электропроводности среды, методика проведения геофизических работ георадарным методом.

В разделе 3 «Радиолокационное профилирование на Быстринском месторождении», изложено применение георадарного метода для определения мощности торфяного слоя на линейном участке Быстринского месторождения.

Для выполнения геофизических работ в районах распространения торфов размещались скважины через 25 - 50 метров. При ручном бурении граница между торфом и подстилающим грунтом определялась геологом по показаниям индикатора часового типа. Анализ геофизических работ георадарным методом показал высокую сходимость результатов радиолокационного профилирования и ручного бурения. В отличие от ручного бурения в геофизических исследованиях решающую роль играет диэлектрическая проницаемость. В торфах диэлектрическая проницаемость равна 60, в суглинках – 12, в песках – 4. Следовательно, в торфах всех типов значения диэлектрической проницаемости значительно отличаются от ее значений в суглинках всех типов, и по этой причине граница между торфом и суглинком прослеживается четко и однозначно. К тому же, в отличие от ручного бурения, при радиолокационном профилировании мощность торфа определяется практически непрерывно на протяжении всей трассы.

По результатам работ радиолокационным методом построен сводный разрез в Сургутском районе Быстринского месторождения, изображенный на рис. 1.

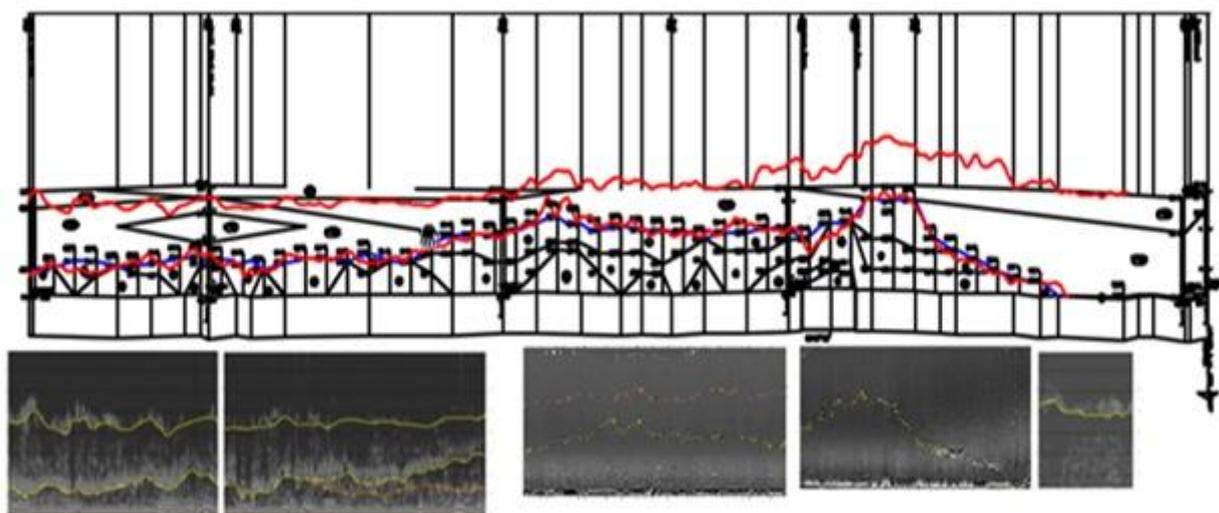


Рис. 1. Сводный разрез.

Синим цветом на этом рисунке показана граница по данным бурения, а красным - по данным метода радиолокационного профилирования. Из рисунка видно, что разрезы, полученные по результатам ручного бурения и радиолокации, незначительно отличаются друг от друга.

В разделе 4 «Исследование глубинности георадарного метода», введены критерии глубинности радиоволнового метода и проведены расчеты максимальной глубины исследования для простой модели геологической среды.

В электроразведке остается мало исследованной проблема глубинности радиоволнового метода. Рассмотрим этот вопрос на простом примере.

Пусть в круговой цилиндрической системе координат  $\rho, \varphi, z$  в области  $z > 0$  задано однородное полупространство с электропроводностью  $\sigma$ , диэлектрической  $\varepsilon$  и магнитной  $\mu$  проницаемостями, подстилаемое расположенным в нижнем полупространстве ( $z < 0$ ) идеальным проводником. Предположим, что на оси  $OZ$  в плоскости  $z = H$  находится магнитный диполь, момент которого направлен по оси  $OZ$  и скачком изменяется при  $t = 0$  от некоторого постоянного значения  $M$  до нуля, как показано на рисунке 2.

В силу осевой симметрии магнитный диполь возбуждает в верхнем полупространстве компоненту  $E_\varphi$  напряженности электрического поля и компоненты  $H_\rho, H_z$  напряженности магнитного поля, не зависящие от координаты  $\varphi$ . Эти компоненты поля удовлетворяют уравнениям Максвелла, убывают на бесконечности, а на поверхности раздела  $z = 0$  выполняется краевое условие  $E_\varphi = 0$ . Для нахождения электромагнитного поля воспользуемся

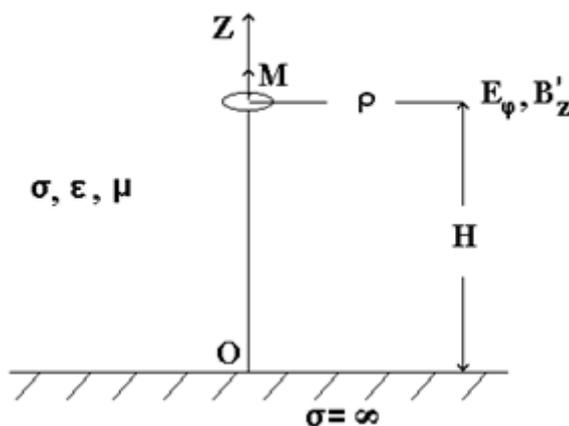


Рис.2. Модель среды – полупространство, ограниченное идеальным проводником.

методом зеркальных отображений. Согласно этому методу, электромагнитное поле в точке  $(\rho, \varphi, z)$  есть сумма двух полей, одно из которых создается исходным диполем в однородном пространстве с электрическими параметрами  $\sigma, \epsilon, \mu$  (в отсутствии идеального проводника), а другое – в том же пространстве, но возбуждается магнитным диполем момента  $M$ , расположенным на оси  $OZ$  в точке  $z = -H$  и направленным против оси  $OZ$ . Моменты обоих диполей выключаются одновременно при  $t = 0$  по ступенчатому закону.

Компонента  $E_\varphi^0$ , возбуждаемая ступенчатым выключением момента магнитного диполя в однородном пространстве, имеет вид

$$E_\varphi^0 = E_\varphi^0(T, \rho, x) = \beta \rho e^{-T} \frac{I_2(x)}{x^2} U(x), \quad (1)$$

где  $I_n(x)$  - модифицированная функции Бесселя 1-го рода порядка  $n$  действительного аргумента  $x$ ;  $U(x)$  - функция Хевисайда;  $T = \frac{\sigma t}{2\varepsilon}$ ;

$$x = \sqrt{T^2 - R^2}; \quad R = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon} \frac{\sigma}{2} \sqrt{\rho^2 + (z - H)^2}}; \quad \beta = \left(\frac{\mu}{\varepsilon}\right)^{5/2} \frac{M\sigma^4}{64\pi}.$$

Применяя метод зеркальных отображений и формулу (1), нетрудно записать выражение для компоненты  $E_\varphi$  в полупространстве, подстилаемом идеальным проводником:

$$E_\varphi = E_\varphi^0(T, \rho, x_+) - E_\varphi^0(T, \rho, x_-), \quad (2)$$

$$\text{где } x_\pm = \sqrt{T^2 - R_\pm^2}; \quad R_\pm = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon} \frac{\sigma}{2} \sqrt{\rho^2 + (z \mp H)^2}}.$$

В дальнейшем будем рассматривать электромагнитное поле в плоскости  $z = H$ . Тогда в выражении (2) следует положить

$$R_+ = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon} \frac{\sigma \rho}{2}}, \quad R_- = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon} \frac{\sigma}{2} \sqrt{\rho^2 + 4H^2}}, \quad (3)$$

Найдем теперь по формуле

$$B_z' = \frac{\partial B_z}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho E_\varphi) \quad (4)$$

производную по времени компоненты  $B_z$  напряженности магнитного поля.

Подставляя (1) – (3) в формулу (4), получаем выражение

$$B_z'(T, \rho, x) = B_z'^0(T, \rho, x_+) - B_z'^0(T, \rho, x_-), \quad (5)$$

$$B_z'^0(T, \rho, x) = \frac{\partial B_z^0}{\partial t} = \beta \frac{e^{-T}}{x^2} \left[ R^2 \frac{I_3(x)}{x} - 2I_2(x) \right] U(x), \quad (6)$$

где  $B_z^0$  - компонента  $B_z$  магнитной индукции в однородном пространстве.

Компоненты  $E_\varphi$  и  $B_z'$  отвечают двум модификациям метода становления поля. В обоих случаях роль генераторной петли играет магнитный диполь, однако,  $E_\varphi$  соответствует методу “петля в петле”, когда приемной петлей является соосно расположенная с магнитным диполем

круговая петля радиуса  $\rho$ , измеряющая эдс индукции  $2\pi\rho E_\varphi$ , во втором же случае  $B'_z$  определяет эдс индукции  $-SB'_z$  в отстоящей от магнитного диполя на расстоянии  $\rho$  приемной петле площади  $S$  (метод q-Q).

На рисунках 3 и 4 для рассматриваемой модели среды с параметрами  $\sigma = 10^{-4} \text{ Cм/м}$ ,  $\varepsilon = \varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ Ф/м}$  (диэлектрическая проницаемость вакуума),  $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  (магнитная проницаемость вакуума),  $\rho = 10 \text{ м}$ ,  $M = 1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ ,  $H = 20 \text{ м}$  в билогарифмическом масштабе сплошной линией изображена зависимость  $E_\varphi$  от времени  $t$ , пунктирной -  $E_\varphi^0$ , а линией с разрядкой -  $E_\varphi^{KB}$ . Кривые рассчитаны с момента времени  $t_0 = \sqrt{\varepsilon\mu} \rho$  - времени прихода электромагнитной волны из точки источника в точку наблюдения (до этого момента времени поле в точке наблюдения равно нулю). С этого отсчета времени до  $t_1 = \sqrt{\varepsilon\mu(\rho^2 + 4H^2)}$  компонента напряженности электрического поля  $E_\varphi$  не отличается от  $E_\varphi^0$ , то есть поле такое же, как и в однородном пространстве. Однако при  $t = t_1$  в точку наблюдения приходит отраженная от плоскости  $z = 0$  волна, компонента  $E_\varphi$  скачком уменьшается на величину  $E_\varphi^0(T_1, \rho, x_-)$ , где  $T_1 = \sigma t_1 / (2\varepsilon)$ , начинается спад этой кривой и на достаточно поздних временах кривая  $E_\varphi$  сливается с кривой  $E_\varphi^{KB}$  в соответствии с асимптотической оценкой

$$E_\varphi - E_\varphi^{KB} \sim \beta \rho \frac{35}{16\sqrt{2\pi}} (R_+^2 - R_-^2) \frac{1}{T^{9/2}}. \quad (7)$$

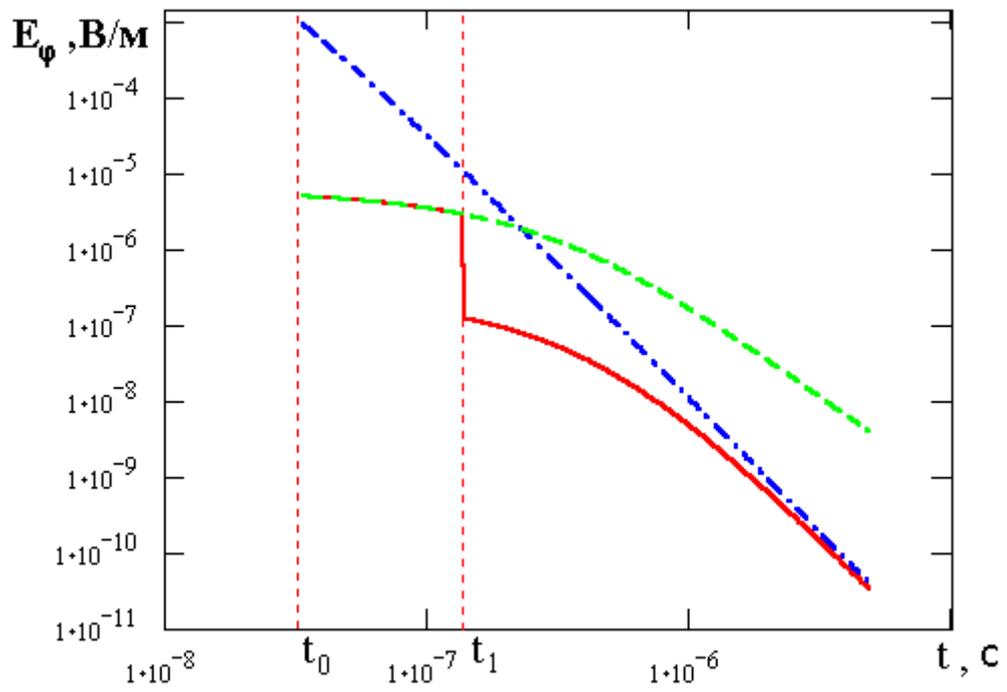


Рис.3. Зависимость компоненты  $E_\phi$  напряженности электрического поля от времени.

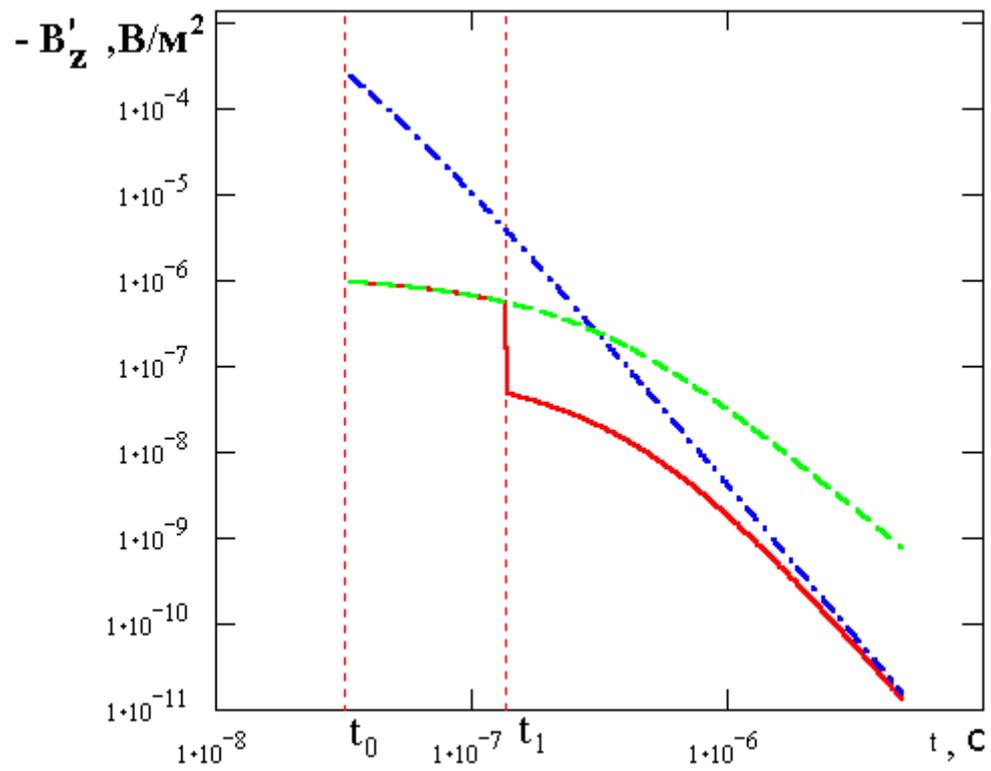


Рис.4. Зависимость производной по времени компоненты  $B'_z$  магнитной индукции.

Введем критерии для определения глубинности радиоволнового метода.

Рассмотрим следующие функции времени  $t$ :

$$\alpha_{E_\varphi}(t) = 100\% * \left| \frac{E_\varphi - E_\varphi^0}{E_\varphi^0} \right|, \quad (8)$$

$$\alpha_{B'_z}(t) = 100\% * \left| \frac{B'_z - B'^0_z}{B'^0_z} \right|, \quad (9)$$

где  $\alpha_{E_\varphi}(t)$  – модуль относительного отклонения в процентах функции  $E_\varphi$  от функции  $E_\varphi^0$  в момент времени  $t$ ,  $\alpha_{B'_z}(t)$  модуль относительного отклонения в процентах функции  $B'_z$  от функции  $B'^0_z$  в момент времени  $t$ .

Рассмотрим также величины

$$J_{E_\varphi} = \alpha_{E_\varphi}(t_1 + 0), \quad J_{B'_z} = \alpha_{B'_z}(t_1 + 0), \quad (10)$$

равные, соответственно, величине скачка функций  $\alpha_{E_\varphi}(t)$  и  $\alpha_{B'_z}(t)$  в момент времени  $t_1 + 0$ .

Будем считать, что для заданных параметров  $\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\mu$ ,  $\rho$  возможно по результатам измерений волнового электромагнитного поля определить глубину  $H$  залегания идеального проводника, если скачки  $J_{E_\varphi}$  и (или)  $J_{B'_z}$  достаточно велики, т.е.

$$J_{E_\varphi} \geq \delta, \quad J_{B'_z} \geq \delta, \quad (11)$$

где величина  $\delta$ , измеряемая в процентах, зависит от погрешностей измерительной аппаратуры и уровня помех. Положим, например,  $\delta = 5\%$ . Тогда для этих параметров существует такая глубина  $H_{E_\varphi}$ , что

$$J_{E_\varphi} \geq 5\% \text{ при } H < H_{E_\varphi} \text{ и } J_{E_\varphi} < 5\% \text{ при } H > H_{E_\varphi}. \quad (12)$$

В этом случае будем говорить, что при измерении ЭДС установкой “петля в петле” глубина исследования ограничена значением  $H_{E_\varphi}$ .

Аналогично, существует глубина  $H_{B'_z}$ , для которой

$$J_{B'_z} \geq 5\% \text{ при } H < H_{B'_z} \text{ и } J_{B'_z} < 5\% \text{ при } H > H_{B'_z}, \quad (13)$$

и тогда при измерении ЭДС установкой “петля-петля” глубина исследования георадарного метода ограничена значением  $H_{B'_z}$ . Рассмотрим примеры.

Пусть, вначале,  $\sigma = 0.02$  См/м, что соответствует удельному объемному сопротивлению  $50$  Ом\*м,  $\epsilon = 60\epsilon_0$ ,  $\mu = \mu_0$ ,  $\rho = 0.5$  м,  $M = 1$  А·м<sup>2</sup>. Результаты расчетов времени  $t_1$  и скачков  $J_{E_\Phi}$  и  $J_{B'_z}$  функций  $\alpha_{E_\Phi}(t)$  и  $\alpha_{B'_z}(t)$  приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчет времени  $t_1$  прихода отраженной волны и величины скачков  $J_{E_\Phi}$  и  $J_{B'_z}$  для сопротивления  $50$  Ом\*м.

Н,м	$t_1,с$	$J_{E_\Phi},\%$	$J_{B'_z},\%$
1	$5.251 \cdot 10^{-8}$	$1,223 \cdot 10^3$	572,77
2	$1.043 \cdot 10^{-7}$	$2,812 \cdot 10^2$	101,4
4	$2.073 \cdot 10^{-7}$	46	8,1
6	$3,117 \cdot 10^{-7}$	12	16,47
7	$3,619 \cdot 10^{-7}$	5,9	13,9
8	$4.16 \cdot 10^{-7}$	3,01	10,4
9	$4,687 \cdot 10^{-7}$	1,494	7,179
10	$5,178 \cdot 10^{-7}$	$6,9 \cdot 10^{-1}$	4,481

Как следует из таблицы 1, с увеличением глубины  $H$  возрастает время  $t_1$  прихода в точку наблюдения отраженной от идеального проводника электромагнитной волны. Кроме того, с ростом  $H$  уменьшаются скачки  $J_{E_\Phi}$ ,  $J_{B'_z}$ . Применяя критерии (12) и (13) к таблице 1, можно приближенно найти  $H_{E_\Phi} \cong 7$  м и  $H_{B'_z} \cong 9$  м. Таким образом, для заданных параметров  $\sigma$ ,  $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\rho$  максимальная глубина исследования  $H_{E_\Phi}$  для установки “петля в петле” меньше чем максимальная глубина исследования  $H_{B'_z}$  для установки “петля-петля”.

Пусть теперь среда имеет те же параметрами, что и в рассмотренном примере, кроме проводимости  $\sigma$ , которую положим равной  $\sigma = 0.01$ , что соответствует удельному объемному сопротивлению  $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Результаты расчетов для такого сопротивления представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчет времени  $t_1$  прихода отраженной волны и величины скачка  $J_{E\phi}$  и  $J_{B_z'}$  для сопротивления  $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

H,m	$t_1, \text{с}$	$J_{E\phi}, \%$	$J_{B_z'}, \%$
1	$5,5356 \cdot 10^{-8}$	$5,029 \cdot 10^3$	$2,472 \cdot 10^3$
2	$1,043 \cdot 10^{-7}$	$1,229 \cdot 10^3$	574,173
4	$2,073 \cdot 10^{-7}$	$2,218 \cdot 10^2$	101,788
8	$4,16 \cdot 10^{-7}$	49,28	7,9
14	$7,26 \cdot 10^{-7}$	6	13,9
15	$7,78 \cdot 10^{-7}$	4,2	12,19
16	$8,265 \cdot 10^{-7}$	2,93	10,351
19	$9,887 \cdot 10^{-7}$	1.03	5.75
20	$1,039 \cdot 10^{-6}$	$7.11 \cdot 10^{-1}$	4.53

Воспользовавшись критериями (12) и (13), из таблицы 2 находим  $H_{E\phi} \cong 14 \text{ м}$  и  $H_{B_z'} \cong 19 \text{ м}$ . Сравнивая с предыдущим примером, видим, что увеличение в 2 раза удельного объемного сопротивления приводит к двукратному увеличению максимальной глубины исследования. Однако в любом случае глубинность установки “петля-петля” превышает глубинность установки “петля в петле”.

**Заключение.** В ходе выполнения настоящей магистерской работы получены следующие результаты:

1. Проведено радиолокационное профилирование на проектируемых автодорогах и нефтепроводах ОАО «Сургутнефтегаз».
2. Обработаны результаты радиолокационного профилирования.
3. Построен сводный георадарный разрез.
4. Рассчитан экономический эффект от уменьшения числа пробуренных скважин.
5. С учетом токов смещения рассчитана напряженность электрического поля и производная по времени магнитной индукции в однородном полупространстве, ограниченном идеальным проводником.
6. Сформулированы критерии глубинности радиолокационного метода.
7. Определена максимальная глубина исследования радиолокационного метода для различных параметров среды и различных приемно-генераторных установок.
8. Исследована степень возрастания глубинности радиолокационного метода по мере увеличения удельного электрического сопротивления среды.
9. Показано, что глубинность установки «петля-петля» превышает глубинность установки «петля в петле».

Таким образом, основные цели задачи магистерской работы выполнены полностью.