

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра Геофизики

**«Зависимость частоты от глубины исследования
в методе частотных зондирований»**

название темы выпускной квалификационной работы полужирным шрифтом

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 5 курса 501 группы
направления (специальности) 05.03.01 Геология
код и наименование направления (специальности)
геологического факультета Саратовского национального
исследовательского государственного университета имени
Н.Г. Чернышевского
наименование факультета, института, колледжа
Тимофеева Тимофея Александровича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

доктор физ.-мат. наук, профессор
должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

В. П. Губатенко

инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой

кандидат геол.-мин. наук, доцент
должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

Е.Н. Волкова

инициалы, фамилия

Саратов 2016 год

ВВЕДЕНИЕ

В основе современной электроразведки лежит понятие скин-эффекта. В соответствии с этим эффектом глубина исследования в методах частотных зондирований повышается с понижением частоты. Такой тенденции изменения глубины исследования от частоты не противоречат известные асимптотики кривых частотных зондирований для горизонтально-слоистой проводящей среды. Действительно, при увеличении частоты электромагнитное поле на высоких частотах стремится к полю, возбуждаемому в проводящем полупространстве с проводимостью первого слоя, а при понижении частоты – к полю в присутствии полупространства с проводимостью последнего слоя (основания разреза). Вместе с тем, до сих пор открыт вопрос о связи частоты и глубины исследования во всем диапазоне генерируемых частот.

Целью настоящей бакалаврской работы является решение задачи о построении зависимости частоты от глубины исследования для заданного геоэлектрического разреза. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

1. Формирование геоэлектрических разрезов для расчета гармонических электромагнитных полей.
2. Расчет гармонических электромагнитных полей для установки петля в петле в широком диапазоне частот и для заданных разрезов.
3. Построение аномальных кривые частотных зондирований.
4. Нахождение соответствия частоты заданной глубине исследования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В теории частотных зондирований для нахождения гармонического электромагнитного поля применяется метод комплексных амплитуд. Для изложения этого метода рассмотрим уравнения Максвелла во временной

области t . Будем считать, что сторонний ток \mathbf{j}^e , возбуждающий электромагнитное поле в немагнитной среде (магнитная проницаемость $\mu = \mu_0$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м) с проводимостью $\sigma(x, y, z)$, где x, y, z – прямоугольные декартовы координаты, имеет вид $\mathbf{j}^e = \mathbf{j}(x, y, z)\psi(t)$, соответствующий синфазному стороннему току. Тогда получим

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \sigma \mathbf{E} + \mathbf{j}(x, y, z)\psi(t), \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{E}(x, y, z, t) = (E_x, E_y, E_z)$ и $\mathbf{H}(x, y, z, t) = (H_x, H_y, H_z)$ – напряженности электрического и магнитного поля.

Пусть теперь $\psi(t) = e^{-i\omega t}$, где ω – круговая частота; i – мнимая единица. В этом случае будем искать решение уравнений (1) в виде

$$\mathbf{E} = \check{\mathbf{E}}(x, y, z, \omega)e^{-i\omega t}, \quad \mathbf{H} = \check{\mathbf{H}}(x, y, z, \omega)e^{-i\omega t}, \quad (2)$$

где $\check{\mathbf{E}}(\omega) = (\check{E}_x, \check{E}_y, \check{E}_z)$ и $\check{\mathbf{H}}(\omega) = (\check{H}_x, \check{H}_y, \check{H}_z)$ называются комплексными амплитудами напряженностей электрического и магнитного поля. Подставляя (2) в уравнения (1), после сокращения полученного на множитель $e^{-i\omega t}$, получаем

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \check{\mathbf{H}} &= \sigma \check{\mathbf{E}} + \mathbf{j}(x, y, z), \\ \operatorname{rot} \check{\mathbf{E}} &= i\omega\mu_0 \check{\mathbf{H}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Решение этих уравнений с соответствующими условиями сопряжения и условиями на бесконечности определяет комплексные амплитуды $\check{\mathbf{E}}(\omega)$ и $\check{\mathbf{H}}(\omega)$, а также, в соответствии с формулой (2), – электромагнитное поле \mathbf{E} и \mathbf{H} . Следует заметить, что $\check{\mathbf{E}}(\omega)$ и $\check{\mathbf{H}}(\omega)$ тождественно равны преобразованиям Фурье напряженности электрического и магнитного поля, возбуждаемого сторонним током \mathbf{j}^e при $\psi(t) = \delta(t)$, где $\psi(t) = \delta(t)$ – дельта-функция Дирака.

Применяя формулу Эйлера запишем выражения (2) в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \check{\mathbf{E}}(x, y, z, \omega) e^{-i\omega t} = \mathbf{i} |\check{E}_x| \left[\cos(\omega t - \phi_x^E) - i \sin(\omega t - \phi_x^E) \right] + \\ &+ \mathbf{j} |\check{E}_y| \left[\cos(\omega t - \phi_y^E) - i \sin(\omega t - \phi_y^E) \right] + \mathbf{k} |\check{E}_z| \left[\cos(\omega t - \phi_z^E) - i \sin(\omega t - \phi_z^E) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= \check{\mathbf{H}}(x, y, z, \omega) e^{-i\omega t} = \mathbf{i} |\check{H}_x| \left[\cos(\omega t - \phi_x^H) - i \sin(\omega t - \phi_x^H) \right] + \\ &+ \mathbf{j} |\check{H}_y| \left[\cos(\omega t - \phi_y^H) - i \sin(\omega t - \phi_y^H) \right] + \mathbf{k} |\check{H}_z| \left[\cos(\omega t - \phi_z^H) - i \sin(\omega t - \phi_z^H) \right], \end{aligned}$$

где $|\check{E}_x|$, $|\check{E}_y|$, $|\check{E}_z|$, $|\check{H}_x|$, $|\check{H}_y|$, $|\check{H}_z|$ и ϕ_x^E , ϕ_y^E , ϕ_z^E , ϕ_x^H , ϕ_y^H , ϕ_z^H , – модули и аргументы (фазы) соответствующих комплексных компонент векторов $\check{\mathbf{E}}(\omega) = (\check{E}_x, \check{E}_y, \check{E}_z)$ и $\check{\mathbf{H}}(\omega) = (\check{H}_x, \check{H}_y, \check{H}_z)$.

Покажем, как применяются комплексные амплитуды для нахождения гармонических электромагнитных полей. Предположим, что сторонний ток изменяется по закону $\mathbf{j}^e = \mathbf{j}(x, y, z) \cos(\omega t)$, то есть $\psi(t) = \cos(\omega t)$. В соответствии с формулой Эйлера $\psi(t) = e^{-i\omega t} = \cos(\omega t) - i \sin(\omega t)$, принципом суперпозиции и формулами (4) можем

$$\mathbf{E} = \mathbf{i} |\check{E}_x| \cos(\omega t - \phi_x^E) + \mathbf{j} |\check{E}_y| \cos(\omega t - \phi_y^E) + \mathbf{k} |\check{E}_z| \cos(\omega t - \phi_z^E),$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{i} |\check{H}_x| \cos(\omega t - \phi_x^H) + \mathbf{j} |\check{H}_y| \cos(\omega t - \phi_y^H) + \mathbf{k} |\check{H}_z| \cos(\omega t - \phi_z^H).$$

В случае, если сторонний ток имеет вид $\mathbf{j}^e = \mathbf{j}(x, y, z) \sin(\omega t)$, то есть $\psi(t) = \sin(\omega t)$, то сторонний ток создает гармоническое поле

$$\mathbf{E} = \mathbf{i} |\check{E}_x| \sin(\omega t - \phi_x^E) + \mathbf{j} |\check{E}_y| \sin(\omega t - \phi_y^E) + \mathbf{k} |\check{E}_z| \sin(\omega t - \phi_z^E),$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{i} |\check{H}_x| \sin(\omega t - \phi_x^H) + \mathbf{j} |\check{H}_y| \sin(\omega t - \phi_y^H) + \mathbf{k} |\check{H}_z| \sin(\omega t - \phi_z^H).$$

Заметим, что модули $|\check{E}_x|$, $|\check{E}_y|$, $|\check{E}_z|$, $|\check{H}_x|$, $|\check{H}_y|$, $|\check{H}_z|$ являются амплитудами электрического и магнитного полей в направлении осей OX , OY и OZ .

Аналогично вводятся комплексные амплитуды для электродвижущей силы и компонент поля в ортогональных криволинейных координатах.

С помощью генератора случайных чисел задана проводимость 13 слойного геоэлектрического разреза, который назовем *нормальным разрезом*. Для этого разреза будет определена зависимость частоты от глубины

исследования. Мощности с 1 по 12 слой одинаковы и равны 200м. Последний 13- й слой (полупространство) является основанием разреза. Распределение проводимости слоев представлено в таблице 1.

На основе сформированного 13 слойного разреза построено еще двенадцать вспомогательных разрезов. Каждый i -й вспомогательный разрез является i слойным разрезом, имеющим такое же строение как и 13 слойный разрез, если его i -й слой заменить полупространством с проводимостью σ_i . Иными словами, вспомогательные разрезы являются *аномальными* по отношению к нормальному 13 слойному разрезу, и отличаются от него начиная с некоторой глубины: чем больше слоев у вспомогательного разреза, тем меньше он отличается от нормального разреза.

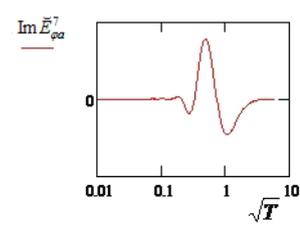
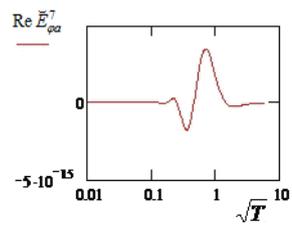
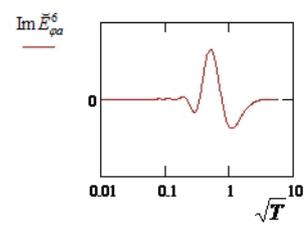
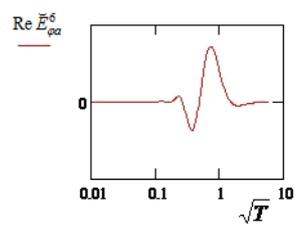
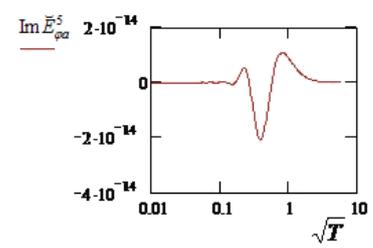
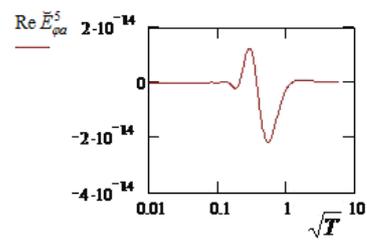
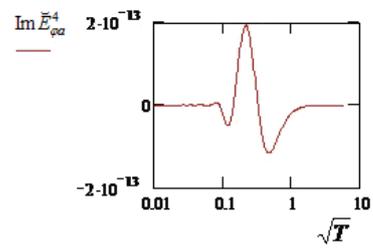
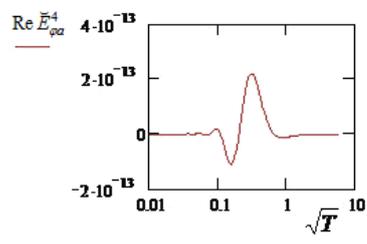
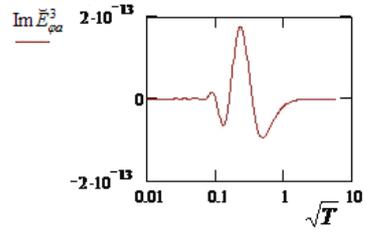
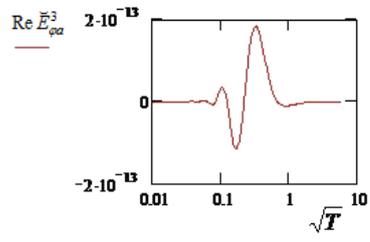
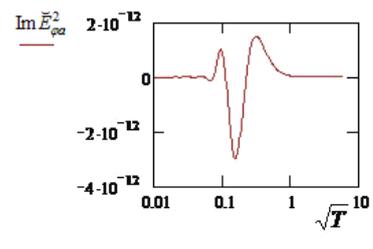
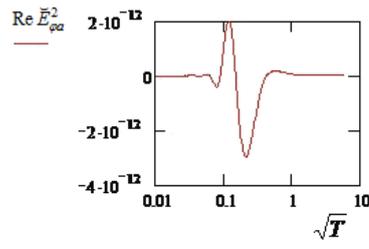
Таблица 1 – Распределение проводимости слоев геоэлектрического разреза

i -й слой	Проводимость σ_i , См/м
1	0.44
2	0.0355677
3	0.0189948
4	0.704718
5	0.0445268
6	0.0260115
7	0.34745
8	0.0233497
9	0.888893
10	0.165025
11	0.00387277
12	0.329827
13	0.0001

Рассмотрим гармоническое электромагнитное поле, возбуждаемое вертикальным магнитным диполем, расположенным на дневной поверхности 13 слойного разреза и двенадцати вспомогательных разрезов. В круговой

цилиндрической системе координат электрическое поле имеет только одну отличную от нуля компоненту E_φ . По программе EPIW, разработанной В.П. Губатенко и А.А. Назаровым, проведен расчет комплексной амплитуды \check{E}_φ на удалении $\rho = 500$ м от магнитного диполя и амплитуды M магнитного момента равной 1 Ам^2 .

Обозначим $\check{E}_\varphi^i = \text{Re } \check{E}_\varphi^i + i \text{Im } \check{E}_\varphi^i$ комплексную амплитуду, соответствующую i разрезу ($i = 1, 2, \dots, 13$). Далее рассмотрим аномальные комплексные амплитуды $\check{E}_{\varphi a}^{i+1} = \check{E}_\varphi^{13} - \check{E}_\varphi^i$, $i = 1, 2, \dots, 12$. Аномальные комплексные амплитуды $\check{E}_{\varphi a}^{i+1}$ характеризуют отклонение электрического поля в присутствии нормального разреза от поля, соответствующего вспомогательным разрезам. На рисунке 1 построены зависимости действительных и мнимых частей аномальных комплексных амплитуд $\check{E}_{\varphi a}^{i+1}$, $i = 1, 2, \dots, 12$ от \sqrt{T} , где $T = \frac{1}{f}$ – период колебаний; f – частота. Из этих рисунков следует, что на высоких частотах f (малых периодах T) комплексные амплитуды $\check{E}_{\varphi a}^{i+1}$ практически не отличаются от комплексных амплитуд \check{E}_φ^i , $i = 1, 2, \dots, 12$. Однако с некоторой частоты f_i (периода T_i) их различие становится заметным. Чем больше i , то есть чем меньше нормальный разрез отличается от аномального, тем меньше частота f_i (больше период T_i). Это говорит о том, что для каждой глубины исследования существует такая частота, начиная с которой можно обнаружить нижежащий слой в нормальном разрезе (13 слойного разреза) и нельзя в противном случае.



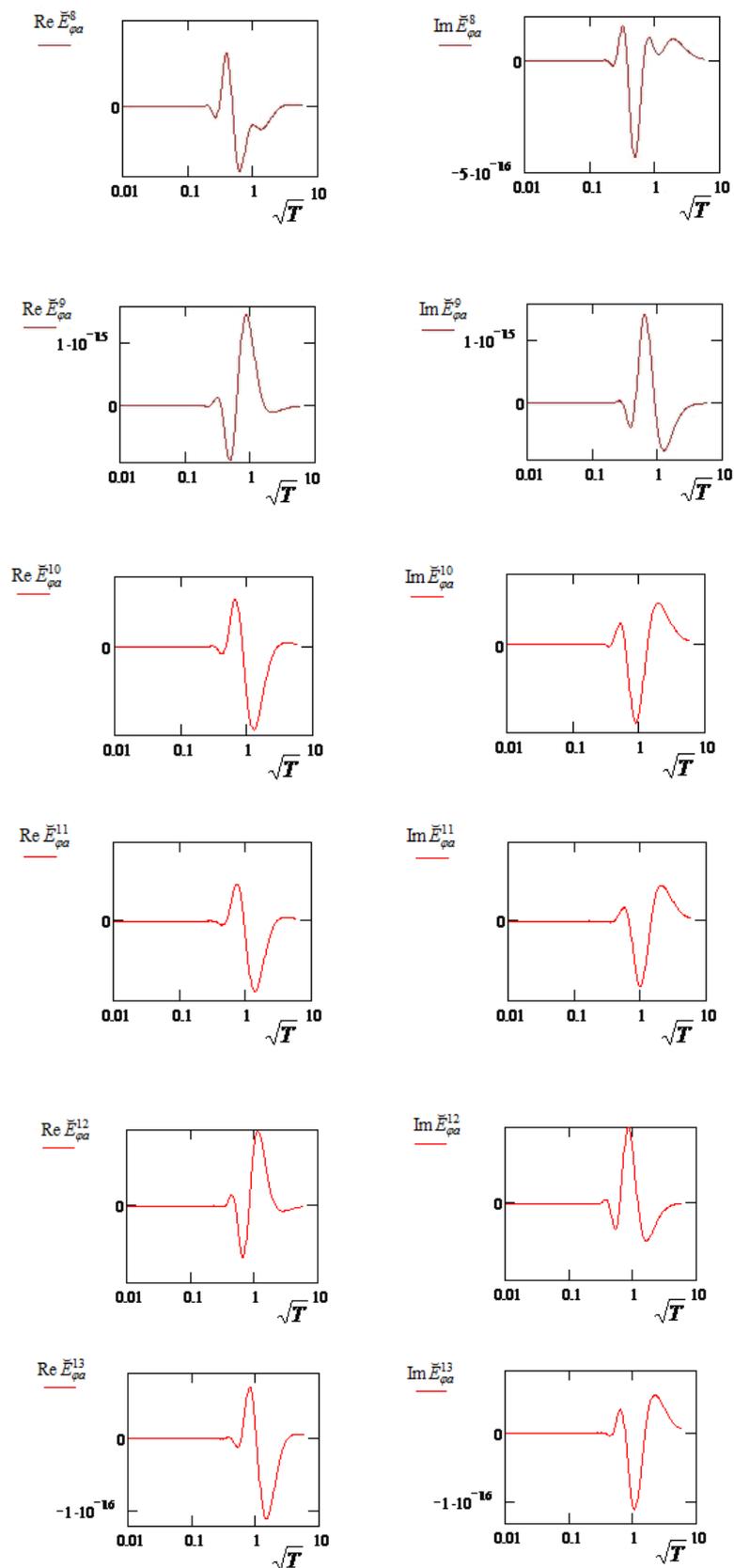


Рисунок 1 - Зависимость действительной и мнимой части аномальных комплексных $\tilde{E}_{\varphi a}^j$, $j = 2, 3, \dots, 13$ амплитуд от \sqrt{T}

Кроме комплексных амплитуд \check{E}_ϕ^i , рассчитаны также амплитуды $|\check{E}_\phi^i| = \sqrt{\text{Re}^2 \check{E}_\phi^i + \text{Im}^2 \check{E}_\phi^i}$, $i = 1, 2, \dots, 13$ гармонического электрического поля. На рисунке 2 изображены амплитудные кривые $|\check{E}_\phi^{13}|$ для нормального разреза и амплитудные кривые $|\check{E}_\phi^1|$ для вспомогательного 1 слойного разреза.

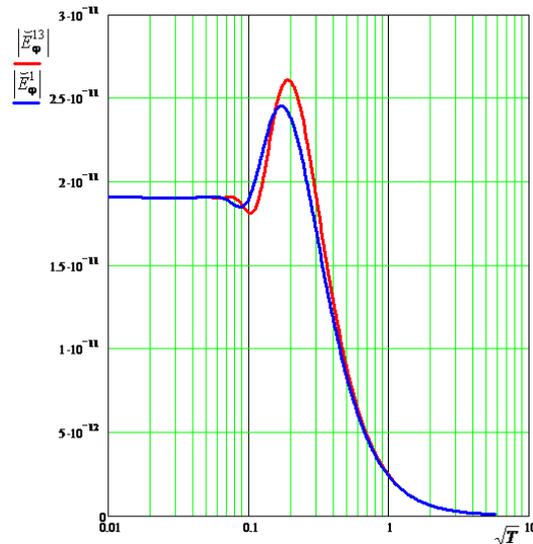


Рисунок 2 - Зависимость амплитуды компоненты $E_{\phi\alpha}$ от \sqrt{T} для 13 слойного разреза и вспомогательного 1 слойного разреза

По формуле $E_{\phi\alpha}^{i+1} = |\check{E}_\phi^{13}| - |\check{E}_\phi^i|$, $i = 1, 2, \dots, 12$ рассчитаны аномальные амплитуды $E_{\phi\alpha}^{i+1}$ электрического поля и изображены на рисунке 3. Видим, что на высоких частотах f так же, как и в случае комплексных амплитуд, амплитуды $E_{\phi\alpha}^{13}$ для нормального разреза практически не отличаются от амплитуд $E_{\phi\alpha}^i$, $i = 1, 2, \dots, 12$. Кроме того, существуют частоты f_i , начиная с которых их отличие становится заметным. С увеличением i уменьшается частота f_i . Таким образом, всякой глубине исследования H отвечает такая частота $f(H)$, что при $f < f(H)$ можно обнаружить нижележащий слой, а при $f > f(H)$ невозможно.

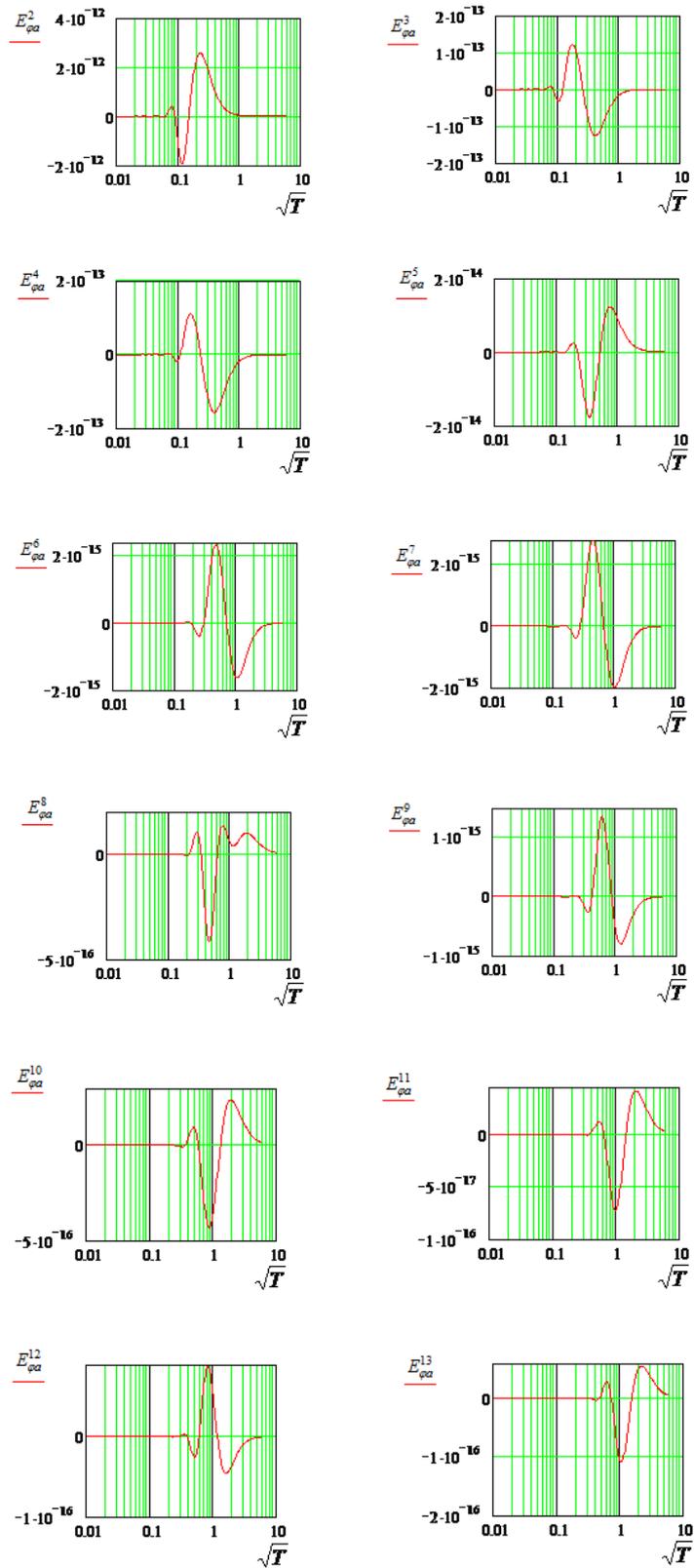


Рисунок 3 - Зависимость аномальных амплитуд $E_{\varphi a}^j$, $j = 2, 3, \dots, 13$ от \sqrt{T}

По результатам расчета аномальных амплитуд $E_{\varphi a}^j$, $j = 2, 3, \dots, 13$ для каждого j -го слоя нормального разреза (13 слойного разреза) определены

частоты f_j такие, что при $f < f_j$ по кривым частотных зондирований можно определить границу кровли j -го слоя, а при $f > f_j$ – невозможно. Зависимость частот от глубины исследования показана в таблице 2 и изображена на рисунке 4. Кривая $f(H)$ монотонно убывает с возрастанием глубины исследования, что не противоречит скин-эффекту.

Таблица 2 – Зависимость частот от глубины исследования

№ слоя	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Глубина залегания, м	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
$f, Гц$	205	120	114	41	26	23	19	11	7	5	4,3	2,4

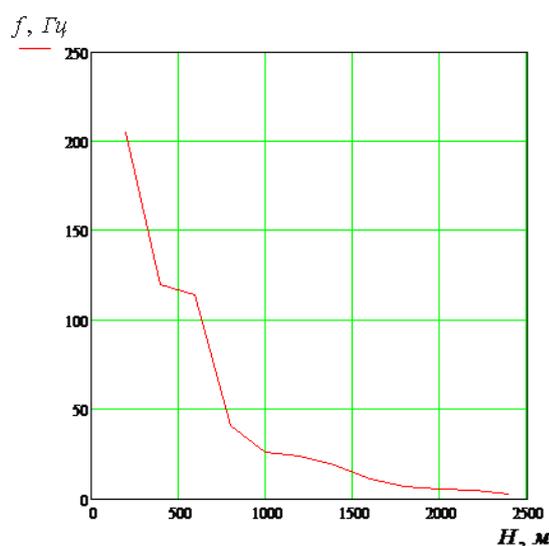


Рисунок 4 - Зависимость частоты от глубины исследования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения бакалаврской работы были получены следующие результаты:

1. Изложен метод комплексных амплитуд для нахождения электромагнитного поля в методе частотных зондирований.

2. Применяя генератор случайных чисел, построен нормальный геоэлектрический разрез и соответствующие ему вспомогательные аномальные разрезы.
3. Для построенных разрезов рассчитаны комплексные амплитуды азимутальной компоненты электрического поля при возбуждении электромагнитного поля вертикальным магнитным диполем. Построены и изображены действительные и мнимые части комплексных амплитуд.
4. Рассчитаны и построены действительные и мнимые части аномальных комплексных амплитуд.
5. Рассчитаны и построены амплитудные кривые для нормального разреза и вспомогательных разрезов. По этим кривым рассчитаны и изображены аномальные амплитуды электрического поля.
6. Показано, что всякой глубине исследования отвечает такая частота, что на меньших частотах можно обнаружить нижележащий слой, а больших – нельзя.
7. Построены таблица и график зависимости частоты от глубины исследования на примере частотных зондирований.

Изложенный метод построения зависимости частоты от глубины исследования применим для известного строения геоэлектрического разреза. Однако этот метод можно использовать для полевых кривых частотных зондирований, воспользовавшись дополнительной информацией о строении геоэлектрического разреза, полученной по результатам каротажных исследований.