

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

Кафедра геофизики

«Исследование становления электромагнитного поля
в промежуточной зоне»

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 261 группы
направление 05.04.01 геология
геологического ф-та
Рахметова Султана Муратовича

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 2017

ВВЕДЕНИЕ

В электроразведке метод становления поля применяют в модификациях дальней и ближней зоны, основанных на особенностях поведения электромагнитного поля в области ранних и поздних стадий становления поля, а также больших и малых разносов. Остаются до сих пор мало изученными закономерности поведения сигнала становления поля в промежуточной зоне, которой посвящена настоящая магистерская работа.

Целью настоящей магистерской работы является изучение основных закономерностей становления электромагнитного поля в промежуточной зоне. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

1. Рассмотреть определение ближней, дальней и промежуточной зоны становления поля с точки зрения асимптотического поведения становления поля на ранних и поздних стадиях становления поля.
2. Ввести понятие квазиволны и времени вступления квазиволны от кровли проводящего слоя горизонтально-слоистой среды.
3. Построить алгоритм нахождения времени вступления квазиволны от каждого слоя построенной с помощью генератора случайных чисел горизонтально-слоистой проводящей среды.
4. Рассчитать времена вступления квазиволн для построенной среды и различных разносов.
5. Исследовать закономерности становление поля в промежуточной зоне в зависимости от изменения разноса.
6. Исследовать разрешающую способности и чувствительность метода становления поля в промежуточной зоне.

Решение поставленных задач позволит лучше понять основные закономерности становления поля на всех стадиях переходного процесса, а также влияние разноса на результаты измерения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Магистерская работа посвящена изучению основных закономерностей становления электромагнитного поля в промежуточной зоне.

В разделе 1 «**Физические основы метода зондирования становлением поля**» изложены способы возбуждения и измерения электромагнитного поля в методе становления поля, а также рассмотрен механизм возникновения в геологической среде тока проводимости, индуцированного ступенчатым отключением электрического тока в питающей линии.

В разделе 2 «**Теоретические основы метода становления поля**» рассмотрено понятие ближней, дальней и промежуточной зоны метода становления поля. В немагнитной среде отмечаются следующие три условия:

$r/\tau \gg 1$, $r/\tau \approx 1$, $r/\tau \ll 1$, где $\tau = 2\pi \sqrt{\frac{2t}{\mu_0 \sigma}}$ – параметр становления поля;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума; r – разнос (расстояние от источника поля до приемника); r/τ – приведенное расстояние; σ – проводимость; $t > 0$ – время становления. Первое условие называют дальней зоной, второе – промежуточной зоной, третье – ближней зоной. Дальняя зона соответствует большому разному r и ранним временам t становления поля, ближняя зона – малым разностям r и поздним временам t .

Такое разделение сигнала становления поля на зоны является условным, так как, например, в случае малого разноса r существуют столь малые времена t , что выполняется условие дальней зоны $r/\tau \gg 1$. Поэтому при фиксированном разноте будем считать условия дальней зоны выполненными на ранних стадиях становления поля, ближней зоны – на поздних временах. Интервал между этими временами соответствует промежуточной зоне.

В случае горизонтально-слоистой проводящей среды хорошо известны асимптотики электромагнитного поля для ранних и поздних стадий становления поля при его индуктивном возбуждении. На ранних временах это поле такое же, как и в случае полупространства с проводимостью первого слоя

горизонтально-слоистой среды. На поздних временах различают два случая – проводящего и непроводящего основания горизонтально-слоистой среды. В первом случае электромагнитное поле стремится к полю в присутствии полупространства с проводимостью основания разреза, а во втором к полю в присутствии проводящей плоскости с поверхностной проводимостью, равной суммарной продольной проводимости геоэлектрического разреза. Поэтому к дальней зоне будем относить те времена, для которых электромагнитное поле практически не отличается от асимптотики ранних стадий становления поля, а к ближней зоне – времена выхода на асимптотику поздних стадий. Интервал между этими временами соответствует промежуточной зоне.

В разделе 3 **«Квазиволновой подход к изучению промежуточной зоны»** развит метод исследования промежуточной зоны, предложенный В.П. Губатенко, В.Г. Осиповым, А.А. Назаровым. На примере становления электромагнитного поля вертикального магнитного диполя, расположенного так же, как и приемник, на дневной поверхности горизонтально-слоистой немагнитной изотропной проводящей среды, ими показано, что квазистационарное электромагнитное поле является квазиволновым. Как и в случае волнового электромагнитного поля, для него существует время вступления к измерительному устройству квазиволны (аномального электромагнитного поля), “отраженной” от границы, отделяющей слои различной электропроводности. До этого момента времени аномальное поле, создаваемое избыточными токами залегающей ниже границы пачке слоев, намного меньше нормального поля вне зависимости от строения геоэлектрического разреза в пределах этой пачки.

Для изучения промежуточной зоны становления поля построена 11-слойная горизонтально-слоистой среда. Мощности первых 10 слоев горизонтально-слоистой среды одинаковы и равны 200 м. Последний 11-й слой среды – полупространство (основание разреза). Проводимости слоев заданы с помощью генератора случайных чисел и даны в таблице 1.

Таблица 1. Проводимости слоев геоэлектрического разреза

| | | | | | | |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Номер i -го слоя | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Проводимость σ_i , См/м | 0.02 | $4.469 \cdot 10^{-2}$ | $2.822 \cdot 10^{-3}$ | $2.783 \cdot 10^{-1}$ | $6.784 \cdot 10^{-3}$ | $7.558 \cdot 10^{-2}$ |
| Номер i -го слоя | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | |
| Проводимость σ_i , См/м | $3.600 \cdot 10^{-4}$ | $3.049 \cdot 10^{-3}$ | $3.700 \cdot 10^{-2}$ | $2.728 \cdot 10^{-1}$ | 0.1 | |

Назовем этот геоэлектрический разрез исходным. Кроме него рассмотрим также вспомогательные геоэлектрические разрезы с индексами L_11_1, L_11_05 и L_11_01. Эти разрезы не отличаются от построенного нами исходного разреза L_11, за исключением проводимости 7-го слоя: в разрезе L_11_1 проводимость равна 1См/м, в разрезе L_11_05 – 0.5 См/м, в разрезе L_01 – 0.1 См/м.

Рассмотрено становление поля, возбуждаемое ступенчатым отключением в отсчет времени $t=0$ момента M вертикального магнитного диполя, расположенного на дневной поверхности построенных горизонтально-слоистых сред. Расчет азимутальной компоненты E_ϕ напряженности электрического поля выполнялся с помощью программы, разработанной В.П. Губатенко и А.А. Назаровым. Всюду полагаем, что $M = 1 \text{ Ам}^2$. Относительная погрешность всех вычислений не превышала 10^{-5} .

Результаты расчета компоненты E_ϕ для разноса $r=500\text{м}$ и геоэлектрических разрезов L_11, L_11_1, L_11_05 и L_11_01 представлены на рисунке 1. Азимутальная компонента напряженности электрического поля для этих разрезов обозначена соответственно E_ϕ , $E_{\phi_{-1}}^7$, $E_{\phi_{-0.05}}^7$, $E_{\phi_{-0.01}}^7$. Видим, что рассчитанные кривые до определенного момента времени практически не отличаются. Чтобы более точно определить этот момент времени, воспользуемся функциями

$$\delta_7^1(t) = \delta[E_{\varphi_{-1}}^7(t); E_{\varphi}(t)] = \frac{E_{\varphi_{-1}}^7(t) - E_{\varphi}(t)}{E_{\varphi}(t)},$$

$$\delta_7^{0.05}(t) = \delta[E_{\varphi_{-0.05}}^7(t); E_{\varphi}(t)] = \frac{E_{\varphi_{-0.05}}^7(t) - E_{\varphi}(t)}{E_{\varphi}(t)},$$

$$\delta_7^{0.01}(t) = \delta[E_{\varphi_{-0.01}}^7(t); E_{\varphi}(t)] = \frac{E_{\varphi_{-0.01}}^7(t) - E_{\varphi}(t)}{E_{\varphi}(t)},$$

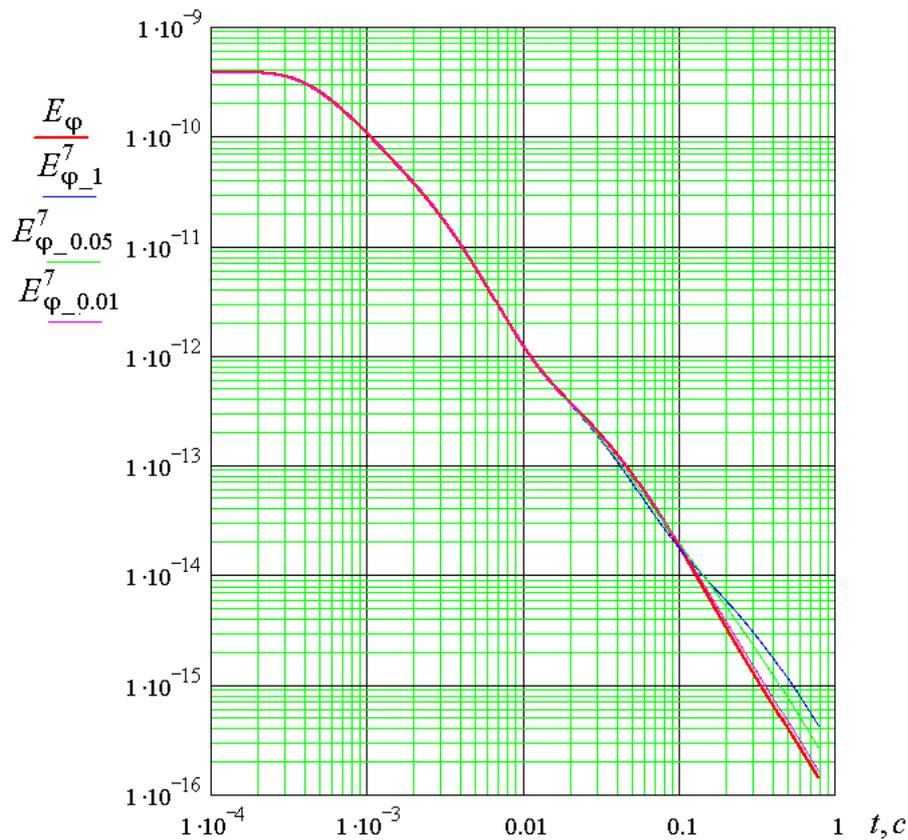


Рис. 1. Зависимость азимутальных компонент E_{φ} , $E_{\varphi_{-1}}^7$, $E_{\varphi_{-0.05}}^7$, $E_{\varphi_{-0.01}}^7$ электрического поля от времени

характеризующие относительное отклонение кривых $E_{\varphi_{-1}}^7$, $E_{\varphi_{-0.05}}^7$, $E_{\varphi_{-0.01}}^7$ от кривой E_{φ} для различных моментов времени. Кривые δ_7^1 , $\delta_7^{0.05}$, $\delta_7^{0.01}$ изображены на рисунке 2. Как видим, относительное отклонение $E_{\varphi_{-1}}^7$, $E_{\varphi_{-0.05}}^7$, $E_{\varphi_{-0.01}}^7$ от E_{φ} незаметно при $t < 0.01$ с, но при $t > 0.01$ с оно значимо.

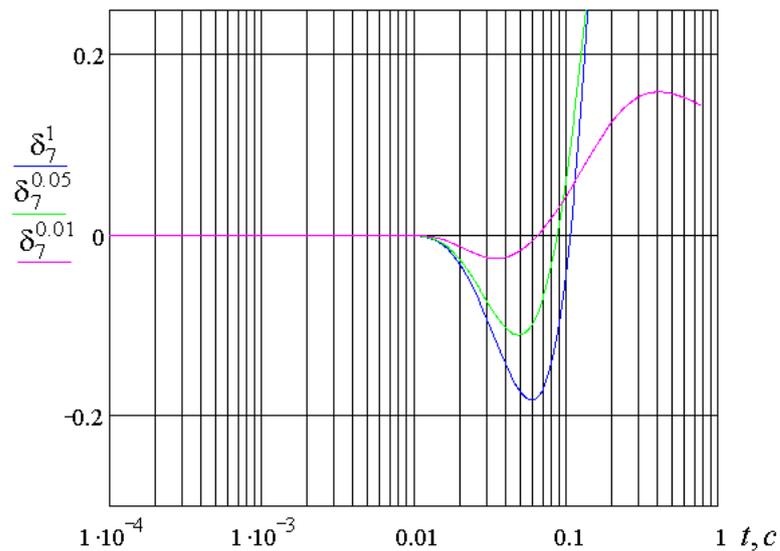


Рис. 2. Относительное отклонение кривых $E_{\varphi-1}^7$, $E_{\varphi-0.05}^7$, $E_{\varphi-0.01}^7$ от кривой E_{φ}

Таким образом, как бы ни изменялась проводимость 7- го слоя исходного геоэлектрического разреза L_11 кривые азимутальных компонент напряженности электрического поля в соответствии с условием (14) будут практически не различимы до времени $t = 0.01\text{c}$. Это время можно было бы назвать *временем вступления квазиволны*, пришедшей от кровли 7- го слоя в сигнал становления поля. Заметим также, чем больше проводимость 7- го слоя вспомогательного геоэлектрического разреза, тем заметнее на рисунке 2 значение времени вступления.

Для численного определения времени вступления квазиволны от кровли i - го слоя, $i = 2, 3, \dots, 11$ предложен следующий алгоритм:

1. Кроме компоненты E_{φ} , соответствующей исходному разрезу L_11, рассчитывается азимутальная компонента E_{φ}^i для геоэлектрического разреза, отличающегося от исходного разреза только проводимостью i - го слоя. Эта проводимость должна значительно превышать проводимости всех слоев разреза L_11.

2. Рассчитывается относительное отклонение $\delta_i(t)$ кривой E_φ^i от кривой E_φ по формуле

$$\delta_i(t) = \frac{E_{\varphi-1}^i(t) - E_\varphi(t)}{E_\varphi(t)}$$

3. Определяется время вступления t_i от кровли i -го слоя из условий

$$|\delta_i(t)| \leq \alpha \text{ при } 0 < t \leq t_i,$$

$$|\delta_i(t)| > \alpha \text{ при } t = t_i + 0,$$

где α – достаточно малое положительное число.

Очевидно также, что время вступления t_1 от первого слоя равно нулю.

Результаты расчетов времен вступления для разреза L_11, $\alpha = 0.02$ и разносов $r = 200$ м, $r = 500$ м, $r = 1000$ м приведены в таблице 2.

Таблица 2. Времена вступления для разносов 200 м, 500 м, 1000 м

| Номер i -го слоя | Глубина h_i залегания кровли i -го слоя, м | Время вступления t_i , с; $r = 200$ м | Время вступления t_i , с; $r = 500$ м | Время вступления t_i , с; $r = 1000$ м |
|--------------------|--|---|---|--|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 200 | 0.000217 | 0.000255 | 0.000286 |
| 3 | 400 | 0.001047 | 0.001122 | 0.001122 |
| 4 | 600 | 0.003005 | 0.003005 | 0.003086 |
| 5 | 800 | 0.008049 | 0.00821 | 0.008861 |
| 6 | 1000 | 0.01247 | 0.012595 | 0.013062 |
| 7 | 1200 | 0.017842 | 0.017842 | 0.017959 |
| 8 | 1400 | 0.024531 | 0.024288 | 0.02373 |
| 9 | 1600 | 0.03545 | 0.035099 | 0.033951 |
| 10 | 1800 | 0.056027 | 0.055472 | 0.054737 |
| 11 | 2000 | 0.07185 | 0.071139 | 0.070899 |

Из таблицы 2 видим монотонное возрастание времени вступления t_i при увеличении глубины h_i залегания i -го слоя. Для каждого заданного i -го слоя и различных разносов (200 м, 500 м, 1000 м) значения времени вступления мало отличаются друг от друга, а часто даже равны. То же самое показывает рисунок 3, изображающий зависимость времени t от глубины исследования H для

разносов $r=200$ м, $r=500$ м и $r=1000$ м, где красным цветом изображена зависимость времени от глубины исследования для разноса $r=200$ м, синим – для разноса $r=500$ м, зеленым – для разноса $r=1000$ м.

В интервале $t < t_2$ сигнал становления поля (азимутальная компонента напряженности электрического поля) удовлетворяет критериям дальней зоны (электрическое поле практически такое же, как в присутствии однородного

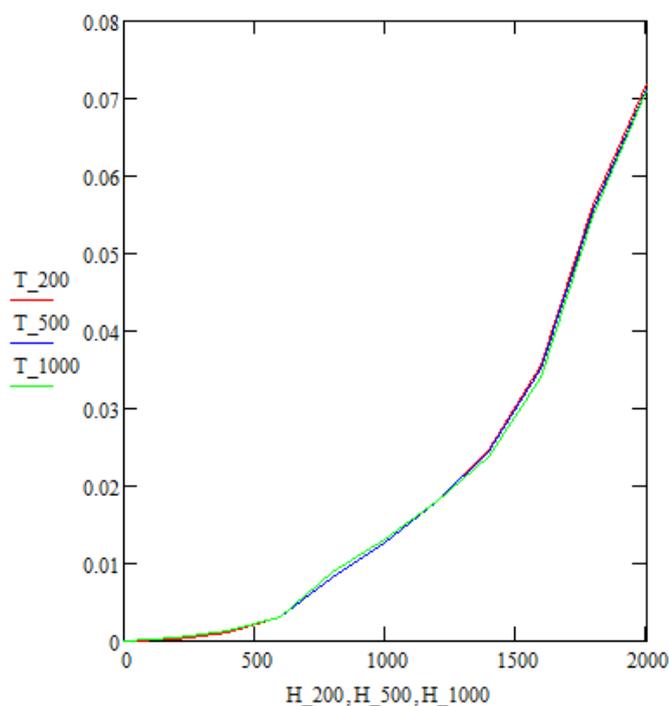


Рис. 3. Зависимость времени t от глубины исследования H для разносов $r=200$ м, $r=500$ м и $r=1000$ м.

полупространства с проводимостью σ_1), а в области $t > t_{11}$ электрическое поле переходит в ближнюю зону (электрическое поле стремится к полю, возбуждаемому вертикальным магнитным моментом в проводящем полупространстве с проводимостью σ_{11}). Вместе с тем, как следует из таблицы 2, времена вступления t_2 и t_{11} , впрочем, как и другие, практически не зависят от разноса. Тем самым, интервалы времени становления, в которых расположены дальняя и ближняя зоны, так же не зависят от разноса, а

определяются при данном способе возбуждения электромагнитного поля только строением геоэлектрического разреза. Такую удивительную закономерность можно также проследить на теоретической модели, рассмотренной в настоящей магистерской работе.

В разделе 4 **«Исследование разрешающей способности и чувствительности метода становления поля в промежуточной зоне»** разрешающая способность и чувствительность метода становления поля изучалась для 24- слойного геоэлектрического разреза. Проводимости слоев этого разреза заданы с помощью генератора случайных чисел и приведены в таблице 3.

Таблица 3. Проводимости слоев геоэлектрического разреза

| | | | | | | |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Номер i - го слоя | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Проводимость σ_i , См/м | $5 \cdot 10^{-3}$ | $6.238 \cdot 10^{-6}$ | $6.251 \cdot 10^{-5}$ | $6.874 \cdot 10^{-3}$ | $4.112 \cdot 10^{-4}$ | $1.193 \cdot 10^{-1}$ |
| Номер i - го слоя | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Проводимость σ_i , См/м | $4.965 \cdot 10^{-5}$ | $3.099 \cdot 10^{-2}$ | $2.358 \cdot 10^{-4}$ | $1.840 \cdot 10^{-5}$ | $3.599 \cdot 10^{-5}$ | $8.711 \cdot 10^{-1}$ |
| Номер i - го слоя | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| Проводимость σ_i , См/м | $2.564 \cdot 10^{-5}$ | $6.838 \cdot 10^{-6}$ | $3.624 \cdot 10^{-3}$ | $8.405 \cdot 10^{-3}$ | $4.517 \cdot 10^{-5}$ | $1.373 \cdot 10^{-3}$ |
| Номер i - го слоя | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| Проводимость σ_i , См/м | $1.218 \cdot 10^{-5}$ | $7.426 \cdot 10^{-2}$ | $3.146 \cdot 10^{-3}$ | $2.257 \cdot 10^{-1}$ | $5.890 \cdot 10^{-1}$ | 10^{-6} |

Мощности слоев одинаковы и равны 150 м. Построенному геоэлектрическому разрезу присвоен индекс 24_150.

Объединим 12-й и 13-й слои разреза 24_150, оставляя другие слои неизменными, и положим, что этот новый объединенный слой имеет мощность 300 м и такую же проводимость, как и проводимость $\sigma_{13} = 2.5648 \cdot 10^{-5}$ См/м 13-го слоя разреза 24_150. Назовем полученный разрез *вмещающей средой* и проиндексируем его числом 24.

Вместим теперь в объединенный слой вмещающей среды **аномальный слой** с проводимостью $\sigma_{12} = 8.71187 \cdot 10^{-1} \text{См/м}$. Такая проводимость является *максимальной* для разреза 24_150 и приурочена к 12-му слою данного разреза. Мощность h аномального слоя будем изменять, полагая $h = 2\text{м}, 5\text{м}, 25\text{м}, 50\text{м}, 100\text{м}, 150\text{м}, 200\text{м}$. Кровля этого слоя пусть расположена на той же глубине 1650 м, что и кровля объединенного слоя разреза 24 (вмещающей среды). Таким образом, кроме геоэлектрического разреза 24_150, соответствующего $h = 150\text{м}$, рассмотрим также разрезы 24_2, 24_5, 24_25, 24_50, 24_100, 24_200, содержащие аномальный слой с мощностями 2м, 5м, 25м, 50м, 100м, 200м. Все эти разрезы отличаются только мощностями 12-го и 13-го слоев, но при этом сумма этих мощностей равна 300 м.

Проведен расчет эдс индукции становления поля, измеряемой в соосно расположенной круговой петле радиуса 550 м, как для нормального разреза, так и для разрезов, содержащих аномальный слой при различных значениях его мощности ($h = 5\text{м}, 25\text{м}, 50\text{м}, 100\text{м}, 150\text{м}, 200\text{м}$). Обозначая $E_N(t)$ эдс индукции для вмещающей среды, а $E_A(h, t)$ – для разрезов с аномальным слоем, рассчитана функция

$$\delta(h, t) = \frac{E_A(h, t) - E_N(t)}{E_N(t)},$$

определяющая относительное отклонение кривой $E_N(t)$ от кривой $E_A(h, t)$. Как следует из расчетов кривых $\delta(h, t)$, чувствительность метода становления поля возрастает при увеличении мощности h аномального слоя.

Максимальное значение $\delta(2, t)$ не превышает 5%, то есть соизмеримо с уровнем погрешностей измерений и с модельными ошибками. Следовательно, распознать в разрезе аномальный слой мощности 2 м невозможно.

Рассчитаны также времена вступления от кровли и подошвы аномального слоя, представленные в таблице 4:

Таблица 4. Времена вступления от кровли и подошвы аномального слоя

| h , м | Время вступления от кровли, с | Время вступления от подошвы, с |
|---------|-------------------------------|--------------------------------|
| 5 | $4.979 \cdot 10^{-3}$ | $6.024 \cdot 10^{-3}$ |
| 25 | $4.979 \cdot 10^{-3}$ | $8.820 \cdot 10^{-3}$ |
| 50 | $4.979 \cdot 10^{-3}$ | 0,012 |
| 100 | $4.979 \cdot 10^{-3}$ | 0,017 |
| 150 | $4.979 \cdot 10^{-3}$ | 0,023 |
| 200 | $4.979 \cdot 10^{-3}$ | 0,028 |

Как и следовало ожидать, время вступления от кровли аномального слоя одно и то же для различных мощностей h этого слоя. Время же вступления от подошвы увеличивается с возрастанием мощности слоя.

Применяя рассчитанные кривые $\delta(h, t)$ для $h = 5\text{м}, 25\text{м}, 50\text{м}, 100\text{м}, 150\text{м}, 200\text{м}$ и таблицу 4, рассчитаны максимальные значения функции $\delta(h, t)$ в интервале t между временами вступления от подошвы и кровли аномального слоя мощности h . Эти значения содержатся в таблице 5.

Таблица 5. Максимальные значения функции $\delta(h, t)$

| h , м | 5 | 25 | 50 | 100 | 150 | 200 |
|---------------------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|
| Максимальное значение $E^r(h, t)$, % | 1.1 | 3.7 | 8.1 | 14.7 | 20.5 | 24.4 |

Отсюда следует, что при увеличении мощности h возрастают максимальные отношения функции $\delta(h, t)$ (в процентах), которые можно назвать разрешающей способностью метода становления поля для задачи определения мощности аномального слоя. Из таблицы 5 видим, что разрешающая способность для мощностей 5 м и 25 м весьма мала, и выделение этих аномальных слоев на фоне помех невозможно. Однако аномальный слой с мощностями 50 м, 100 м, 150 м, 200 м имеет достаточно большую разрешающую способность, что делает возможной задачу его идентификации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной магистерской работы получены следующие результаты:

1. Сформулировано определение ближней, дальней и промежуточной зоны становления поля с точки зрения асимптотического поведения становления поля на ранних и поздних стадиях становления поля.
2. Определено понятие квазиволны и времени вступления квазиволны в сигнал становления поля.
3. Изложен способ нахождения времени вступления квазиволны от каждого слоя для построенной с помощью генератора случайных чисел горизонтально-слоистой проводящей среды.
4. По результатам расчета азимутальной компоненты напряженности электрического поля, возбуждаемой ступенчатым отключением момента вертикального магнитного диполя в присутствии построенной среды, построены кривые зависимости времени становления поля от глубины исследования для различных разносов.
5. Показано, что кривые зависимости времени становления поля от глубины исследования практически не зависят от разноса и определяются лишь строением геоэлектрического разреза. Такая закономерность, полученная по результатам численного эксперимента, подтверждена на примере аналитического решения для простой модели проводящей среды.
6. Исследована разрешающая способность и чувствительность метода становления поля в промежуточной зоне для установки петля в петле. Показано, что разрешающая способность и чувствительность метода становления поля велики по отношению к определению мощности хорошо проводящего аномального слоя.

Все поставленные в настоящей магистерской работе задачи выполнены полностью.