

Санкт-Петербургский государственный университет

ТАРАТЫНОВ Павел Сергеевич

Выпускная квалификационная работа

**Влияние линейных проводящих объектов на результаты
вертикальных электрических зондирований**

Направление 050301 «Геология»

Основная образовательная программа СВ.5018.2016 «Геология»

Научный руководитель:
кандидат физ.-мат. наук,
доцент
Н. Ю. Бобров

18 мая 2020 г



Рецензент:

Генеральный директор ООО
«Бюро геофизического
консалтинга»
А. М. Маренко

Санкт-Петербург

2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ.....	2
2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	5
3. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	13
3.1 Лабораторные эксперименты.....	13
3.2 Полевые эксперименты.....	15
4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	16
4.1 Лабораторное моделирование.....	16
4.2 Полевое моделирование.....	21
5. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	23
6. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РЕЗУЛЬТАТОВ ВЭЗ, ВЫПОЛНЕННЫХ В НОВОМ УРЕНГОЕ.....	27
7. ВЫВОДЫ.....	29
8. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	30

1. ВВЕДЕНИЕ

При проведении электроразведки на постоянном токе на результаты измерений может повлиять нахождение вблизи линии измерений линейных проводящих объектов. При инженерно-геофизических исследованиях в качестве линейного проводника, создающего помехи, могут выступать железные дороги, подземные трубы. Также линейными проводниками могут являться и не антропогенные объекты, например, линейно вытянутые рудные тела.

Подобные линейные проводники могут встречаться и при негеологическом использовании методов электроразведки. Например, при оценке состояния железобетонных конструкций неразрушающими методами электроразведки на результаты измерений может оказывать влияние арматура.

Приведенные выше примеры объединяет невозможность устранить источник помех, что приводит к необходимости учитывать его влияние на измерения.

Примером описанной выше проблемы может послужить исследование состояния железнодорожной насыпи в Новом Уренгое с целью ее реставрации, которое проходило в июле 2019 года. В качестве метода исследования были выбраны вертикальные электрические зондирования. Ввиду того, что железная дорога оставалась действующей на период проведения работ, а также ввиду того, что район проведения работ был сильно заболочен, было принято решение разбить профили и растягивать электрические линии вдоль путей (рис. 1). В ходе работ было получено большое количество кривых ВЭЗ, соответствующих разрезу с промежуточным проводящим слоем (типа Н и Н-К), что могло являться артефактом, вызванным влиянием близко расположенных рельсов.



Рисунок 1: Фотография проведения работ в Новом Уренгое

Целью данной работы являлась оценка влияния железной дороги на результаты электроразведки на постоянном токе на примере вертикальных электрических зондирований при помощи физического и полевого моделирования.

В качестве моделируемой обстановки были выбраны условия проведения работ в Новом Уренгое: линейный проводник располагался у поверхности разреза, параллельно линии измерений. Заземление проводника и расстояние от него до линии измерения могли быть различными, что также учитывалось при подготовке моделирования. Помимо этого, были проведены эксперименты с похожей моделью, но при перпендикулярном расположении линии измерений относительно проводника.

Эксперименты физического моделирования планировалось повторить при помощи полевых измерений вдоль железной дороги в Старом Петергофе.

Были поставлены следующие задачи:

- изучить ранее опубликованные научные работы, посвященные данной проблеме.
- изучить влияние линейного проводника на результаты ВЭЗ при помощи физического моделирования при параллельном и перпендикулярном расположениях проводника относительно линии измерений ВЭЗ;
- изучить зависимость влияния проводника от его поверхностного сопротивления (заземления);
- охарактеризовать аномалии, вызванные проводником;
- провести полевые измерения вблизи железнодорожных путей, повторяющие схему лабораторного эксперимента;
- сопоставить результаты моделирования и полевых измерений;
- дать классификацию типов кривых ВЭЗ по данным полевых работ в Новом Уренгое.

2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Рассматриваемой в работе проблеме посвящено множество научных работ. Наиболее ранней из них можно считать труды классика электроразведки Джеймса Уэйта (James Wait). В 1978-1979 годах он опубликовал статью, в которой в соавторстве с Корада Умашанкар (Korada Umashankar) математически описал влияние погребенного кабеля на измерения кажущегося сопротивления, выполненные на двухэлектродной установке. В результате работы было подтверждено, что длинный линейный неизолированный проводник бесконечной длины будет оказывать существенное влияние на измерения кажущегося удельного сопротивления.

В 1983 году Уэйт опубликовал другую работу, в которой математически описал влияние вертикального цилиндрического проводника бесконечной длины, который моделирует обсадную колонну, выходящую на поверхность. Расчеты показали, что подобный поводящий цилиндр может оказывать существенное влияние на результаты измерения кажущегося сопротивления на расстояниях, превышающих его радиус в десять раз.

Более поздней публикацией на тему влияния линейных проводящих объектов является статья Анны Викери и Брюса Хобса (Vickery, Hobbs 2002). В данной статье помимо изучения аномалий описан метод определения местоположения подземных линейных проводящих объектов (трубопровода), а также разработан способ учета влияния проводника с известным положением в разрезе.

Определение положения проводника, предложенное в данной работе, основано на взаимной корреляции аналитического решения, описанного ранее Уэйтом, и измеренных полей. Удаление полей производится путем умножения исходных значений сопротивления в каждой точке измерения на величину соответствующего значения в аналитическом решении.

Наиболее интересной с точки зрения рассматриваемой проблемы, является работа Уилкинсона (Wilkinson, 2006). В данной работе было проведено моделирование влияния железнодорожного рельса на результаты электротомографии.

Для представления рельса была подобрана модель, представляющая из себя полуцилиндр бесконечной длины, радиусом 0.05 м, помещенный в однородное

полупространство, с сопротивлением $1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Цилиндр является идеальным проводником. Линия измерений расположена на расстоянии 2.6 м от проводника, параллельно ему. Расстояние между электродами составляло 2 м (рис.2).

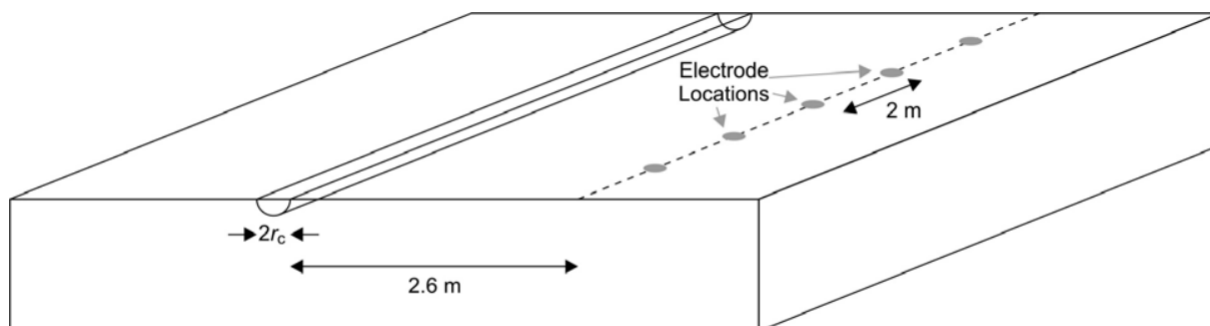


Рисунок 2: Общий вид модели (Wilkinson, 2006)

Эксперимент проводился с использованием пяти различных вариантов размещения приемных и питающих электродов (конфигураций): двухполюсной, поль-диполь, диполь-диполь, Веннер-Шлюмберже и с конфигурацией срединного градиента (рис.3).

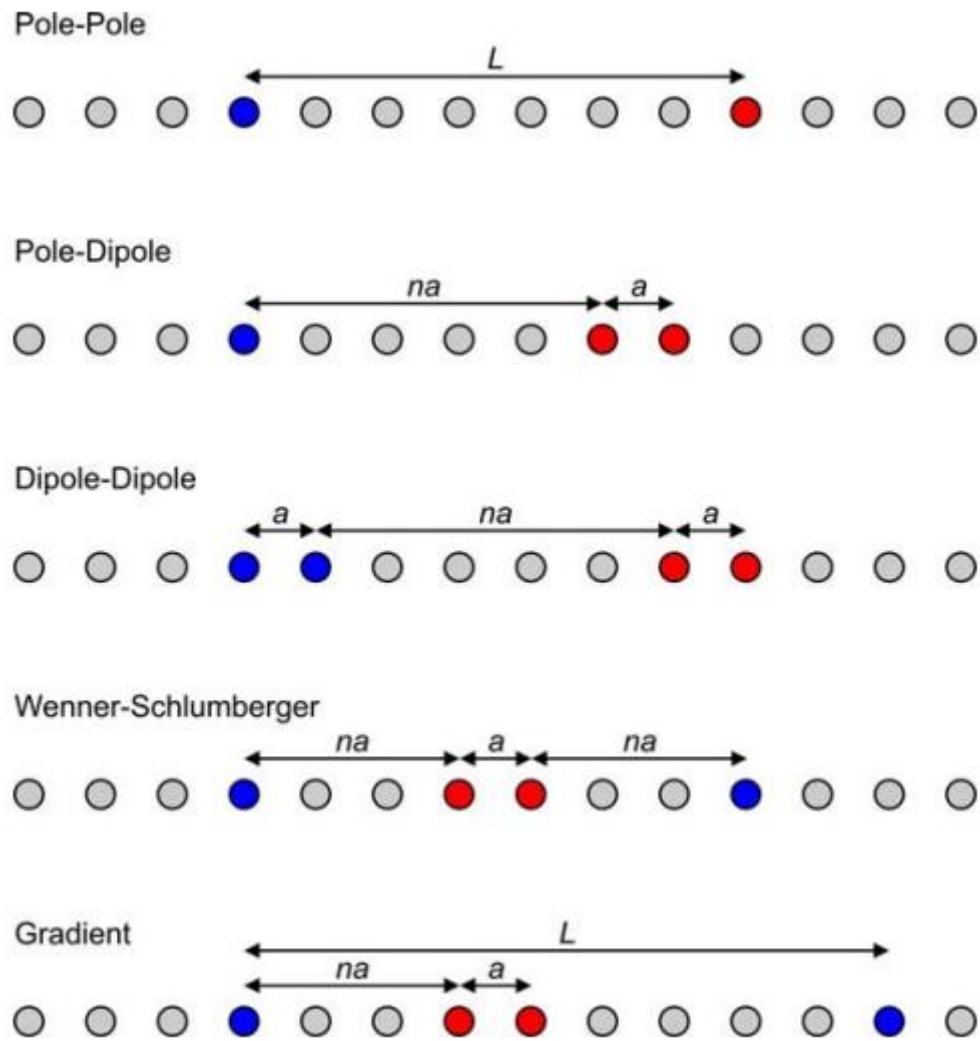


Рисунок 3: Конфигурации установки (Wilkinson, 2006)

Результаты измерений были представлены в виде графиков зависимости $(R_a/R)/Z$, где R_a – измеренное кажущееся сопротивление в модели с проводником, R – измеренное кажущееся сопротивление в модели без проводника, Z – расчетная глубина измерения, численно равная $AB/6$. В подобной форме представления результатов измерений отклонение графика от единицы ($R_a=R$) является результатом влияния линейного проводника (рис.4).

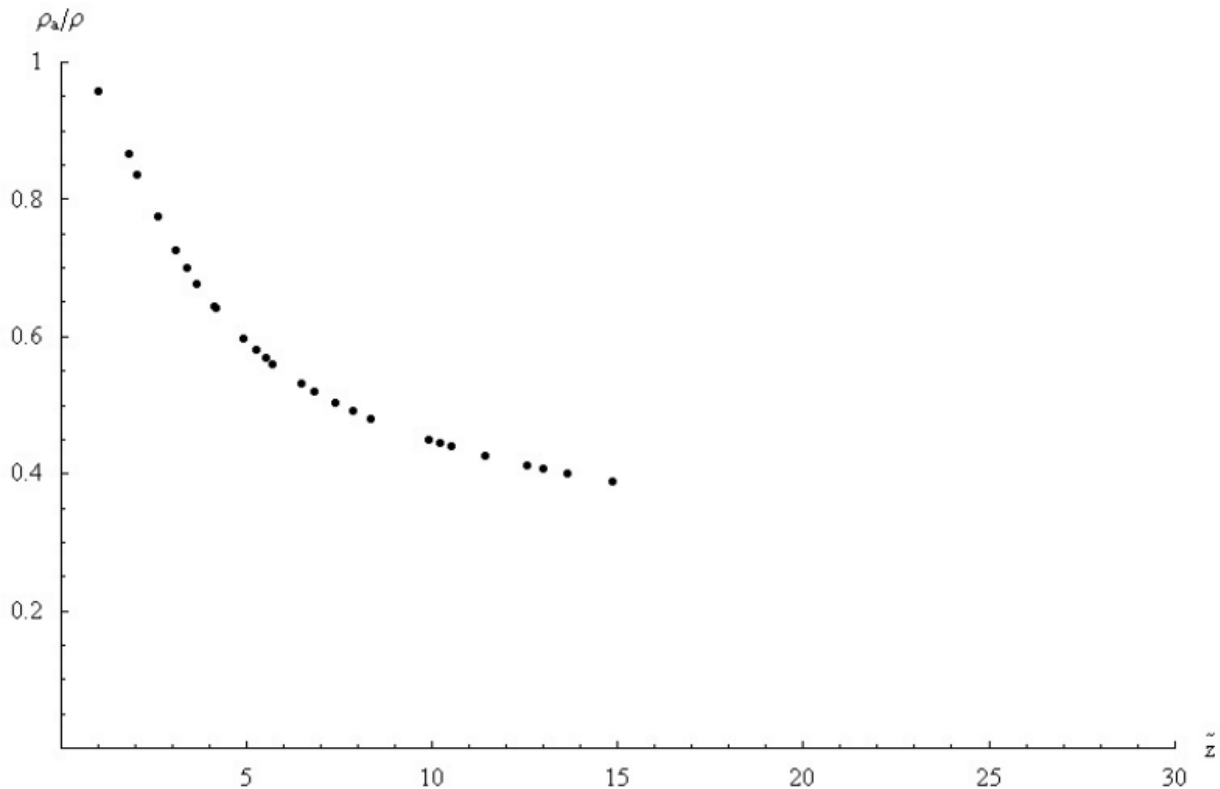


Рисунок 4: График зависимости $(R_a/R)/Z$ для установки Веннера-Шлюмберже (Wilkinson, 2006)

По приведенным результатам, можно заключить, что чем больше глубина исследований, тем больше влияние рельса на результаты измерений.

Также был проведен учет контактного сопротивления. Для этого были построены сводные графики $(R_a/R)/Z$ при различной величине безразмерного параметра $c=1/gRr$, где g – поверхностная проводимость, нормированная на площадь поверхности (Cm/m^2), r – радиус цилиндра (рис. 5). На графиках видно, что при увеличении сопротивления на контакте проводника и среды, влияние проводника уменьшается, и уже при $c=100$ не превышает 4%. При этом графики различных конфигураций начинают расходиться друг от друга при увеличении глубины исследования.

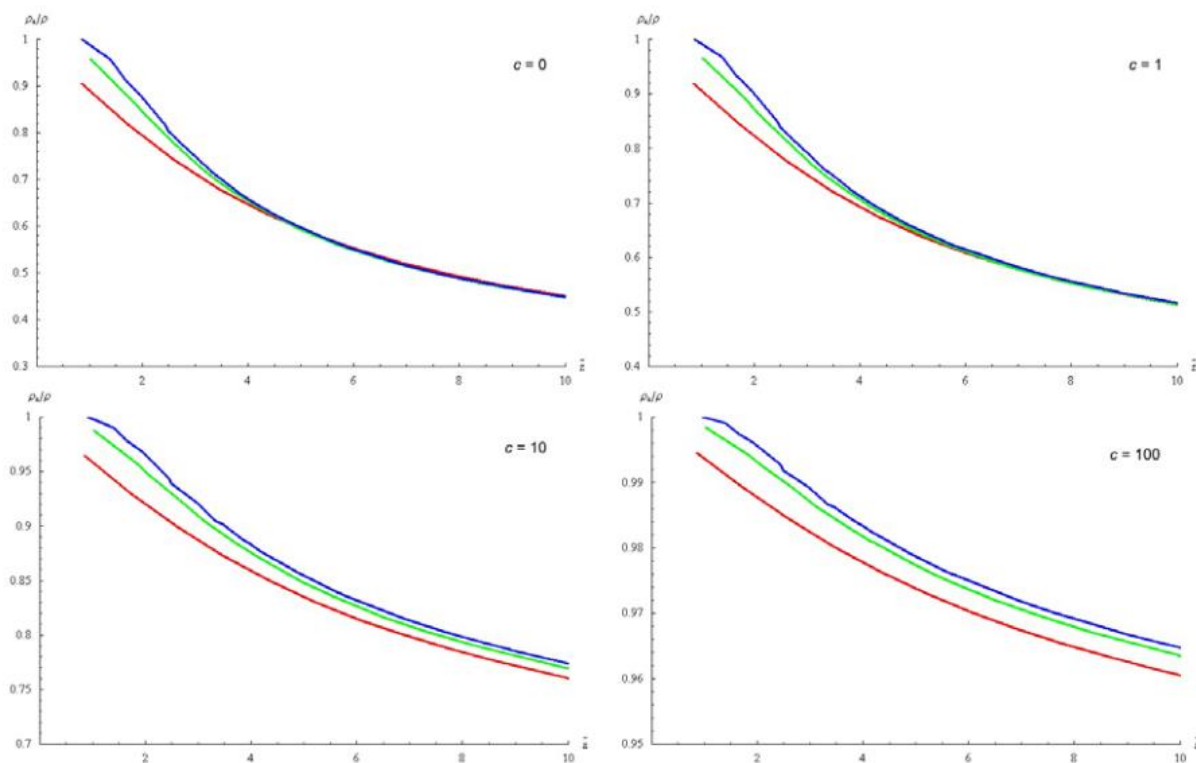


Рисунок 5: Графики диполь-дипольной (синий), двухполюсной (красный) и поль-дипольной (зеленой) конфигураций, при $c=0, 1, 10, 100$ (Wilkinson, 2006)

Наиболее поздней работой, где рассматривается влияние линейных проводящих объектов на результаты измерений методом сопротивлений, является статья «Учет влияния стальной арматуры на профили сопротивления в контексте обследования железобетонных структур» (Alhajj et al, 2019). В данной статье изучается влияние армирующего каркаса бетонных сооружений при проведении контроля состояния методом сопротивлений.

Для изучения этого влияния проводилось математическое и физическое моделирование. Целью моделирования было изучение влияния на характер аномалии, вызванной проводником следующих параметров (рис. 6):

- глубины размещения линейного проводника (изменение параметра h);
- горизонтального удаления оси установки от оси проводника (изменение параметра dX);
- горизонтальной ориентации установки относительно проводника (изменение угла θ);

- сопротивления бетона.

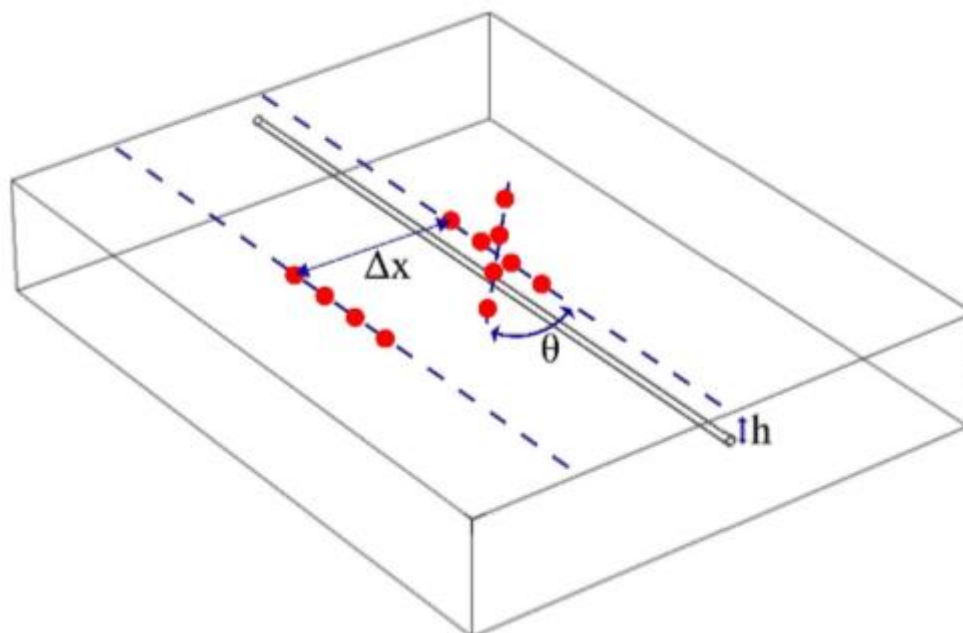


Рисунок 6: Изменяемые параметры модели (Alhajj et al, 2019)

При изучении влияния глубины на кажущееся сопротивление, параметр h принимался равным 20 мм, 25 мм, 30 мм, 35 мм, 40 мм, 50 мм. В результате был получен сравнительный график (рис. 7), из которого следует, что кажущееся сопротивление функционально связано с параметром h и убывает при его увеличении.

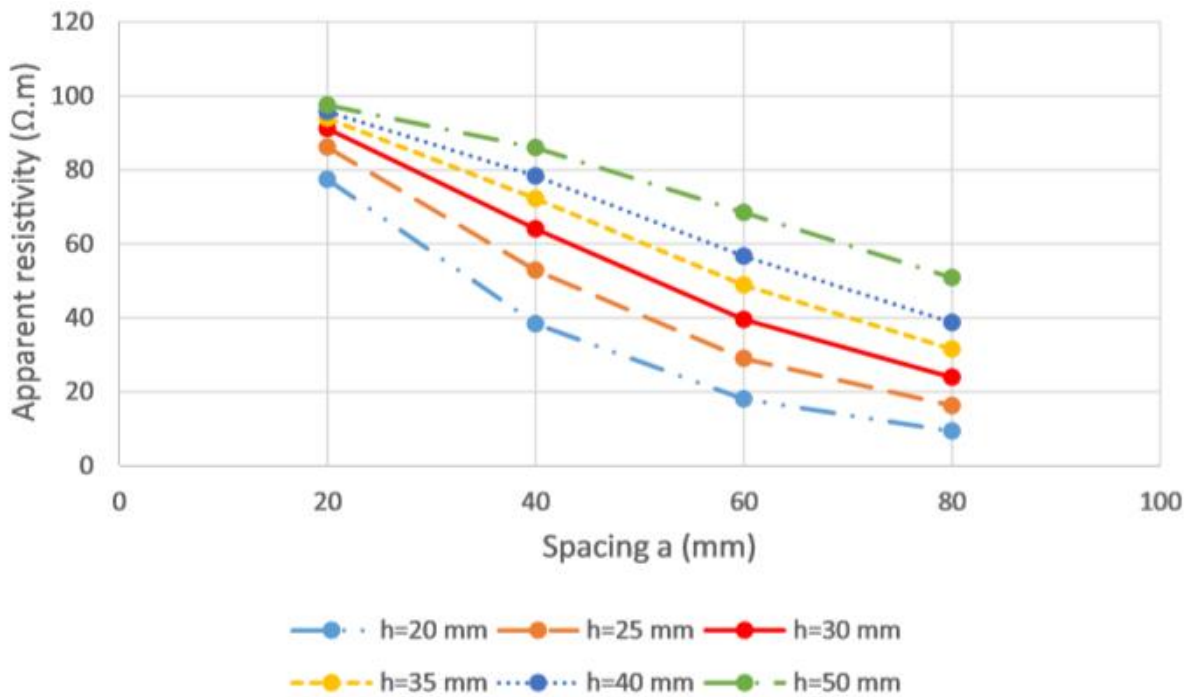


Рисунок 7: Графики измеренного R_k при изменении h от 20мм до 50мм (Alhajj et al, 2019)

При изучении влияния горизонтального удаления оси установки от оси проводника на кажущееся сопротивление параметр dX принимался равным 40 мм, 80 мм и 120 мм. Был получен сравнительный график (рис. 8) и сделан вывод, что чем дальше линия измерения расположена от оси проводника, тем медленнее кажущееся сопротивление изменяется с изменением параметра a .

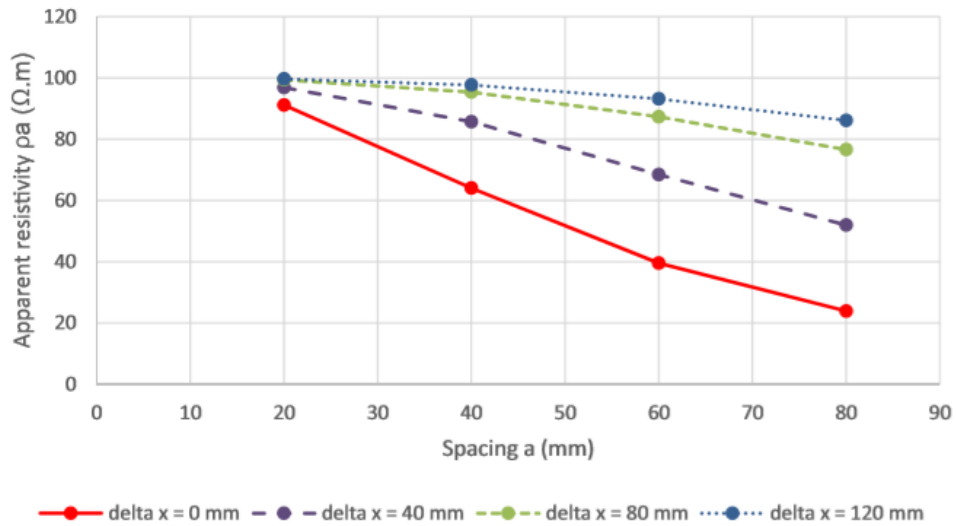


Рисунок 8: Графики измеренного R_k при изменении параметра dX от 0мм до 120мм (Alhajj et al, 2019)

Изучение зависимости кажущегося сопротивления от ориентации проводника проводилось путем изменения угла θ между осями установки и проводника. Результаты представлены в виде графика (рис. 9). По результатам данного опыта был сделан вывод, что с увеличением угла θ уменьшается регистрируемое влияние проводника на кажущееся сопротивление.

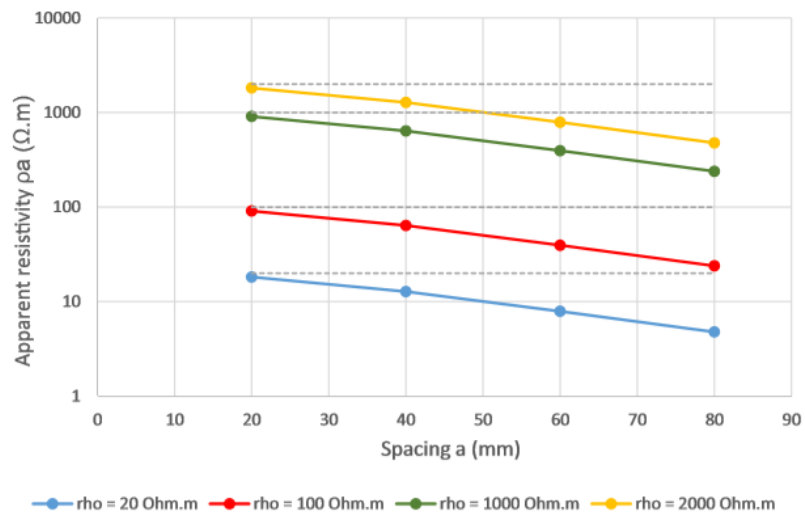


Рисунок 9: Графики измеренного R_k при изменении сопротивления модели (Alhajj et al, 2019)

3. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

3.1 Лабораторные эксперименты

Моделирование производилось на установке, представляющей собой пластиковую кювету заполненную водой с удельным сопротивлением $R_1 = 43 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Глубина бассейна составляла 44 мм. Электроды были заземлены на поверхности воды. Данная модель отвечает двухслойному горизонтальному разрезу, где верхний слой имеет меньшее сопротивление, чем нижний.

В качестве линейного проводника была выбрана прямая медная проволока диаметром 2 мм и длиной, превышающей длину линии измерения. Во всех экспериментах он полностью погружался в воду на незначительную глубину.

На данной модели были проведены серии экспериментов на двух различных установках ВЭЗ. Обе являлись четырехэлектродными симметричными установками Шлюмберже.

Первая представляет собой многоэлектродную косу с ручной коммутацией электродов. Параметры первой установки приведены в таблице:

MN	AB ₁	AB ₂	AB ₃	AB ₄	AB ₅	AB ₆	AB ₇	AB ₈	AB ₉	AB ₁₀	AB ₁₁
1 см	3 см	5 см	7 см	9 см	11 см	13 см	15 см	17 см	19 см	21 см	23 см

Во второй установке в качестве электродов выступают четыре латунные шпильки, переставляемые вручную. Параметры второй установки приведены в таблице:

MN	AB ₁	AB ₂	AB ₃	AB ₄	AB ₅	AB ₆	AB ₇	AB ₈	AB ₉
1,3 см	7,3 см	9,3 см	11,3 см	13,3 см	15,3 см	17,3 см	19,3 см	21,3 см	23,3 см

Частота и сила тока для обеих установок были одинаковы и равны 4,88 Гц и 1 мА соответственно. Для измерений использовались генератор тока «Эра» и приемная аппаратура «Эра-Макс».

На каждой установке были проведены серии экспериментов при различном положении относительно них линейного проводника (рис. 10):

- параллельно установке, на различных расстояниях d от нее,
- перпендикулярно установке, между электродами А и М,
- перпендикулярно установке, между электродами М и N.

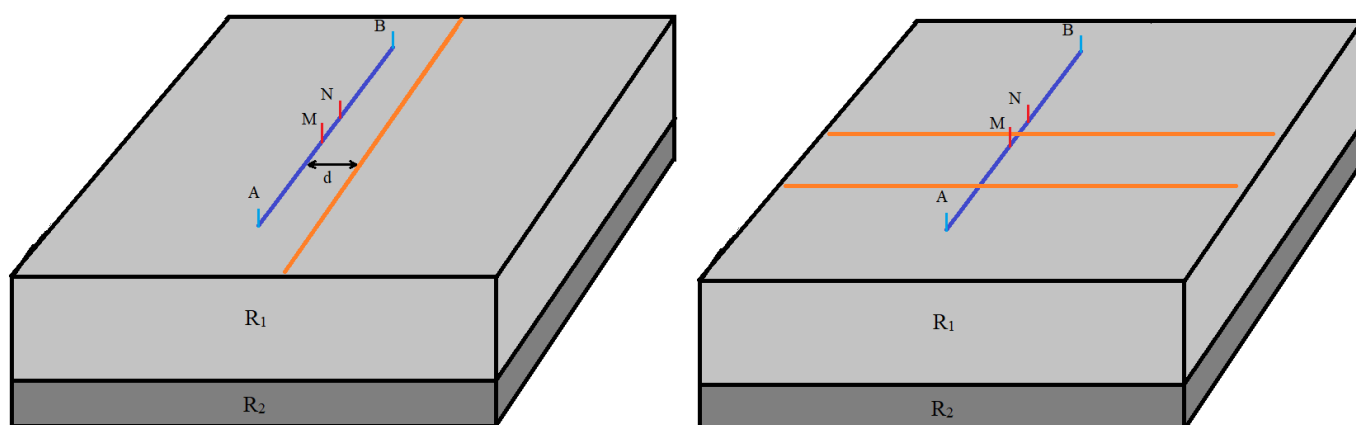


Рисунок 10: Схема взаимного расположения проводника и линии измерений.

Перед проведением каждой серии экспериментов для каждой установки были сделаны измерения без проводника для проведения последующей оценки вызываемой им аномалии.

Также планировалось провести серию экспериментов по изучению величины и характера аномалии при изменении площади контакта проводника со средой. Эти эксперименты должны были продемонстрировать влияние поверхностного сопротивления на величину аномалии. Также в этих экспериментах планировалось изучить изменение характера аномалии в ситуации, когда рельс заземлен лишь в местах контакта с почвой и изолирован на участках, контактирующих со шпалами. К сожалению, эти эксперименты не удалось завершить из-за введенных карантинных мер.

3.2 Полевые эксперименты

Полевые измерения проводились на железной дороге в Старом Петергофе и в общих чертах повторяли лабораторные эксперименты. Всего было произведено 3 измерения с генератором тока «Эра» и приемной аппаратурой «Эра-Макс».

Частота тока во всех полевых измерениях составляла 4,88 Гц, а сила тока 10 мА. Расстояния между электродами приведены в таблице:

AB, м	3	6	9	18	18	30	30	50	80	130
MN, м	1	1	1	1	6	1	6	6	6	6

Первые два измерения проводились параллельно железной дороге. Одно из них на расстоянии 1 метра от ближайшего рельса, на гравийной насыпи. Второе на расстоянии 2,5 метров от рельса вне насыпи.

Третье измерение было проведено перпендикулярно железной дороге на значительном расстоянии от первых двух. Рельсы при этом располагались между электродами А и М на расстоянии 4-6 метров от точки наблюдения, между 2 и 3 разносами АВ.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

4.1 Лабораторное моделирование

По результатам моделирования была построена серия графиков зависимости кажущегося сопротивления от разноса питающих электродов.

При параллельном расположении проводника относительно линии измерения на графиках происходило смещение кривой в сторону меньших сопротивлений (рис. 11-12). Это смещение проявлялось на всех разносах питающих электродов. Смещение уменьшалось при увеличении расстояния d между линией измерения и проводником. Результаты данного эксперимента были идентичны для обеих установок, однако в первой установке, где была возможность провести измерения на меньших разносах, при малых расстояниях d происходила трансформация двухслойной кривой в трехслойную типа Н.

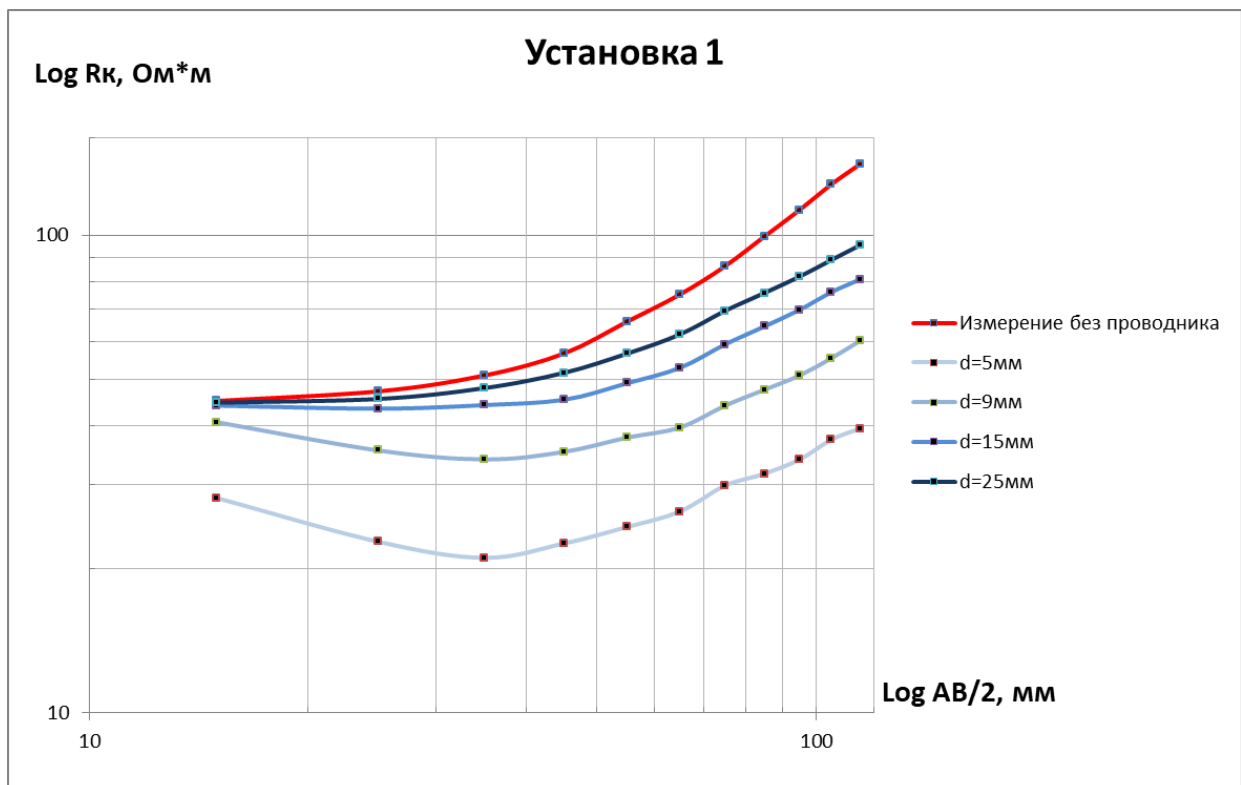


Рисунок 11: Результаты эксперимента с параллельным расположением проводника относительно линии измерений для первой установки.

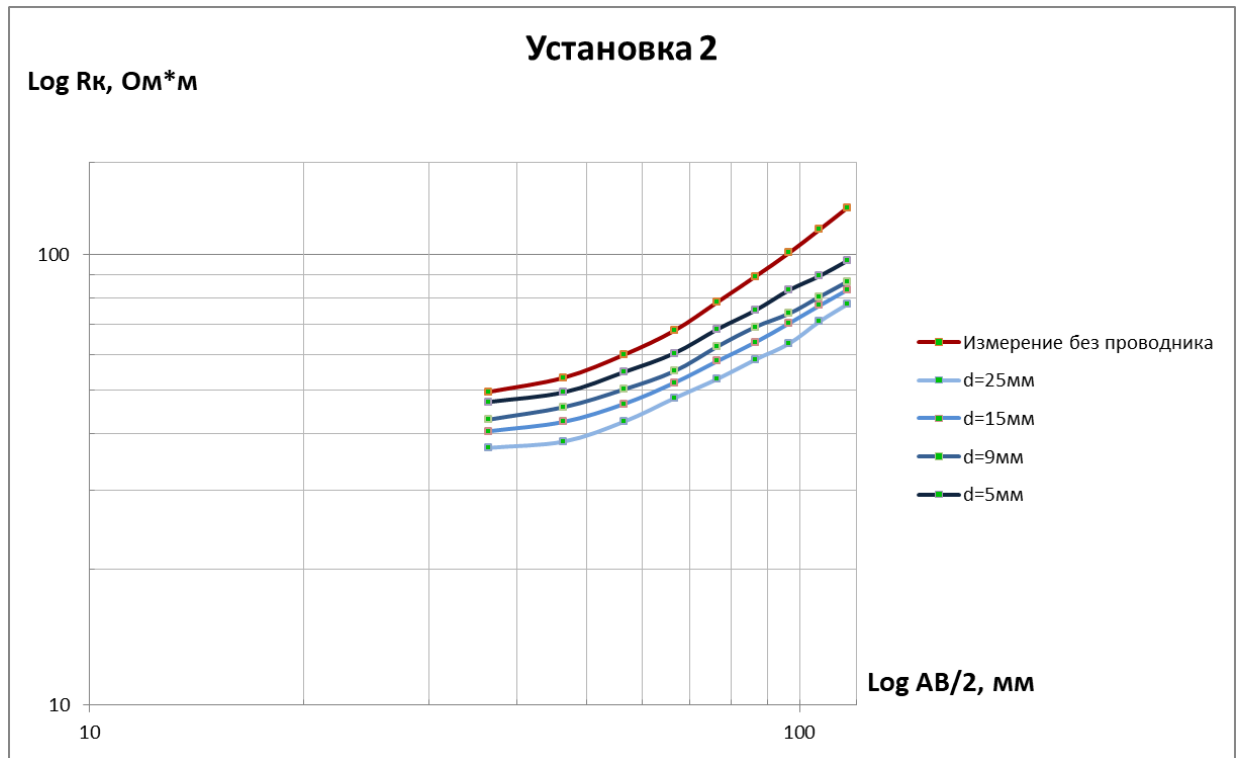


Рисунок 12: Результаты эксперимента с параллельным расположением проводника относительно линии измерений для второй установки.

При размещении проводника перпендикулярно линии наблюдения между приемными электродами М и N кривая ВЭЗ смещалась вдоль оси R_k (рис. 13-14). Форма кривых при этом смещении не изменялась. На первой и второй установках смещение происходила как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения кажущегося сопротивления.

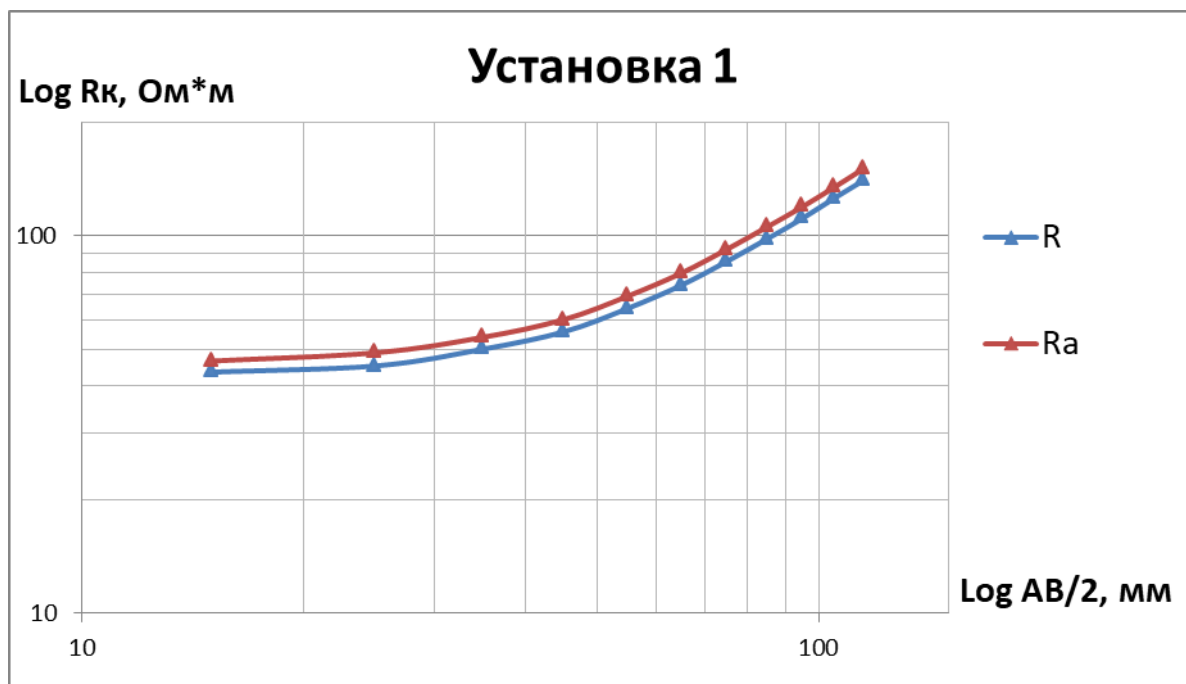


Рисунок 13: Результаты эксперимента с перпендикулярным расположением проводника между приемными электродами относительно линии измерений для первой установки. R – кривая ВЭЗ, измеренная без проводника, Ra – кривая ВЭЗ измеренная с проводником.

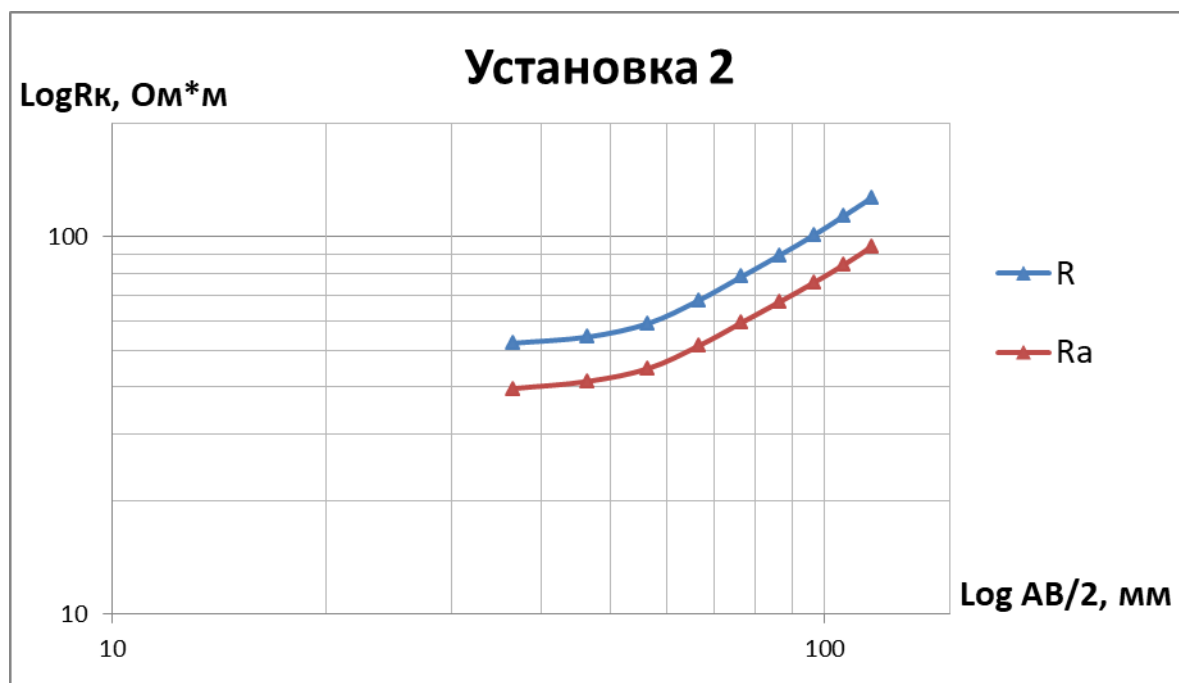


Рисунок 14: Результаты эксперимента с перпендикулярным расположением проводника между приемными электродами относительно линии измерений для второй установки. R – кривая ВЭЗ, измеренная без проводника, Ra – кривая ВЭЗ измеренная с проводником.

На графиках, полученных при размещении проводника перпендикулярно установке между электродами А и М (рис 15-16), наблюдалось смещение кривой сопротивлений в сторону меньших значений. Однако, в отличие от эксперимента с параллельным расположением проводника, смещение в данном эксперименте носило локальный характер. Пониженные значения проявлялись лишь на тех разностях питающих электродов, которые располагались наиболее близко к проводнику.

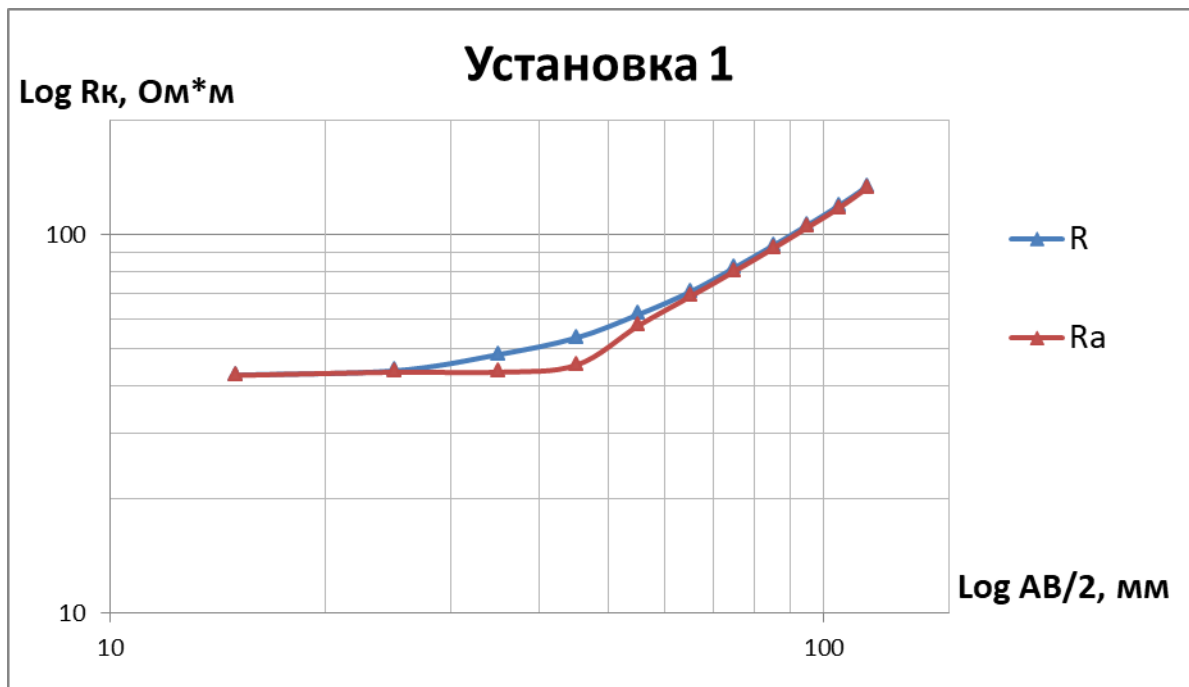


Рисунок 15: Результаты эксперимента с перпендикулярным расположением проводника между приемным и питающим электродами относительно линии измерений для первой установки. R – кривая ВЭЗ, измеренная без проводника, Ra – кривая ВЭЗ измеренная с проводником.

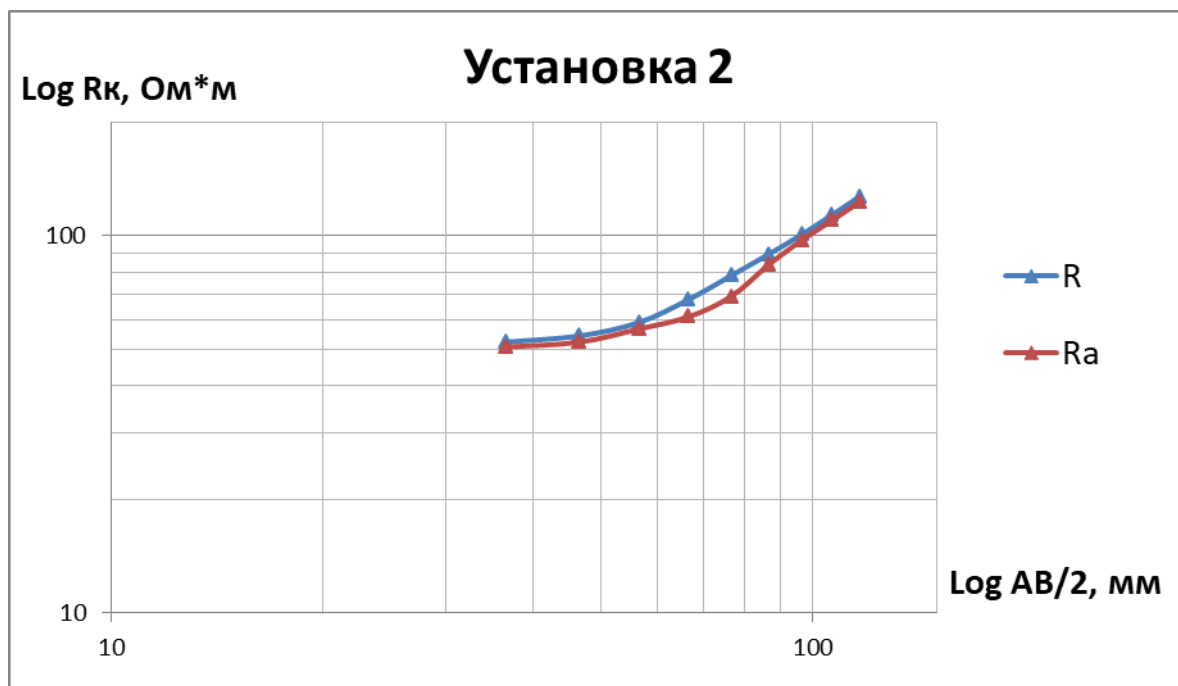


Рисунок 16: Результаты эксперимента с перпендикулярным расположением проводника между приемным и питающим электродами относительно линии измерений для первой установки. R – кривая ВЭЗ, измеренная без проводника, Ra – кривая ВЭЗ измеренная с проводником.

4.2 Полевое моделирование

По результатам полевых экспериментов были построены три кривые ВЭЗ. На двух кривых, полученных при размещении линии наблюдений параллельно железной дороге (рис 17), не наблюдается значимых различий, которые были бы вызваны изменением расстояния между линией наблюдения и проводником, в первую очередь – параллельного смещения кривых ВЭЗ на больших разносах. Небольшие различия на графиках можно связать с изменением геологического разреза в точках наблюдения. Например, повышенное сопротивление на первом разносе ближнего к железной дороге ВЭЗ (синий график) предположительно отвечает гравийной железнодорожной насыпи, на которой производилось измерение.

Кривая ВЭЗ, полученная при расположении линии измерений перпендикулярно железной дороге (рис 18), также не содержит локальных аномалий. Как было описано выше, аномалия ожидалась между 2 и 3 разносами АВ на расстоянии 4-6 метров от точки наблюдения.

Таким образом, результаты полевых экспериментов указывают на отсутствие влияния рельса на результаты измерений.

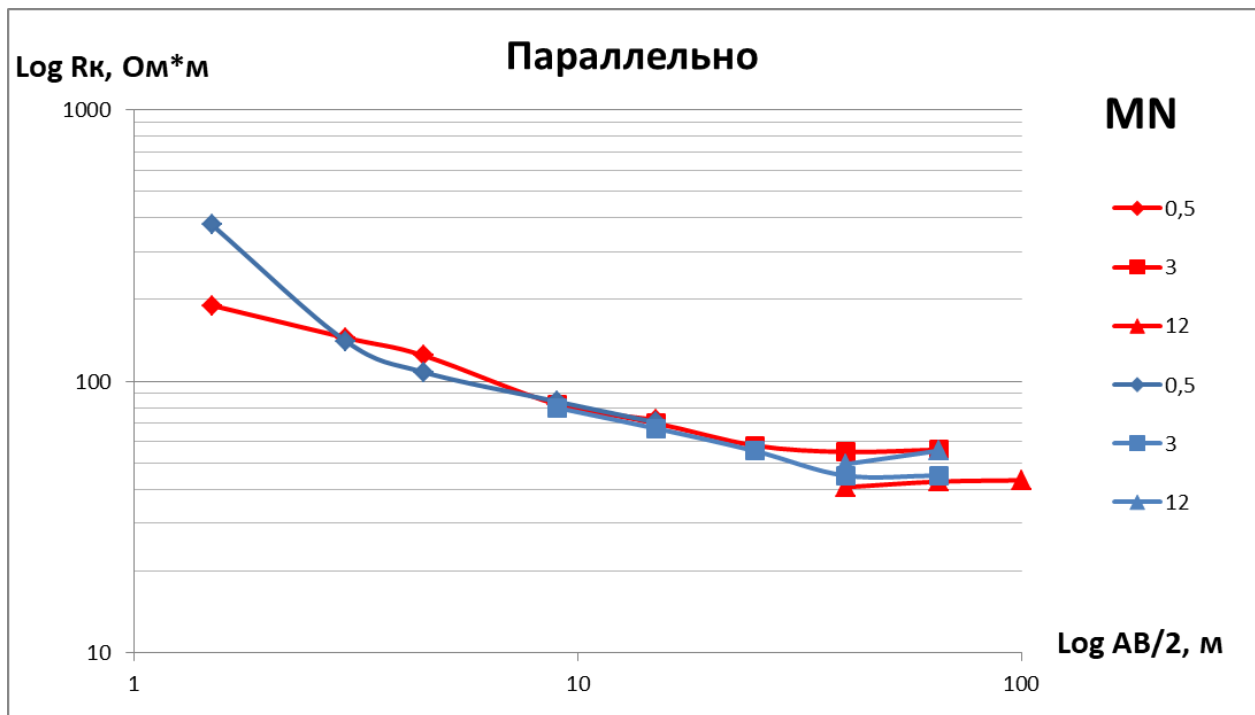


Рисунок 17: Результаты полевых измерений параллельно железнодорожным рельсам. Синий график отвечает ближнему к рельсу измерению ($d=1\text{м}$), а красный – дальнему ($d=2,5\text{м}$). Разные фигуры точек соответствуют различным разносам MN.

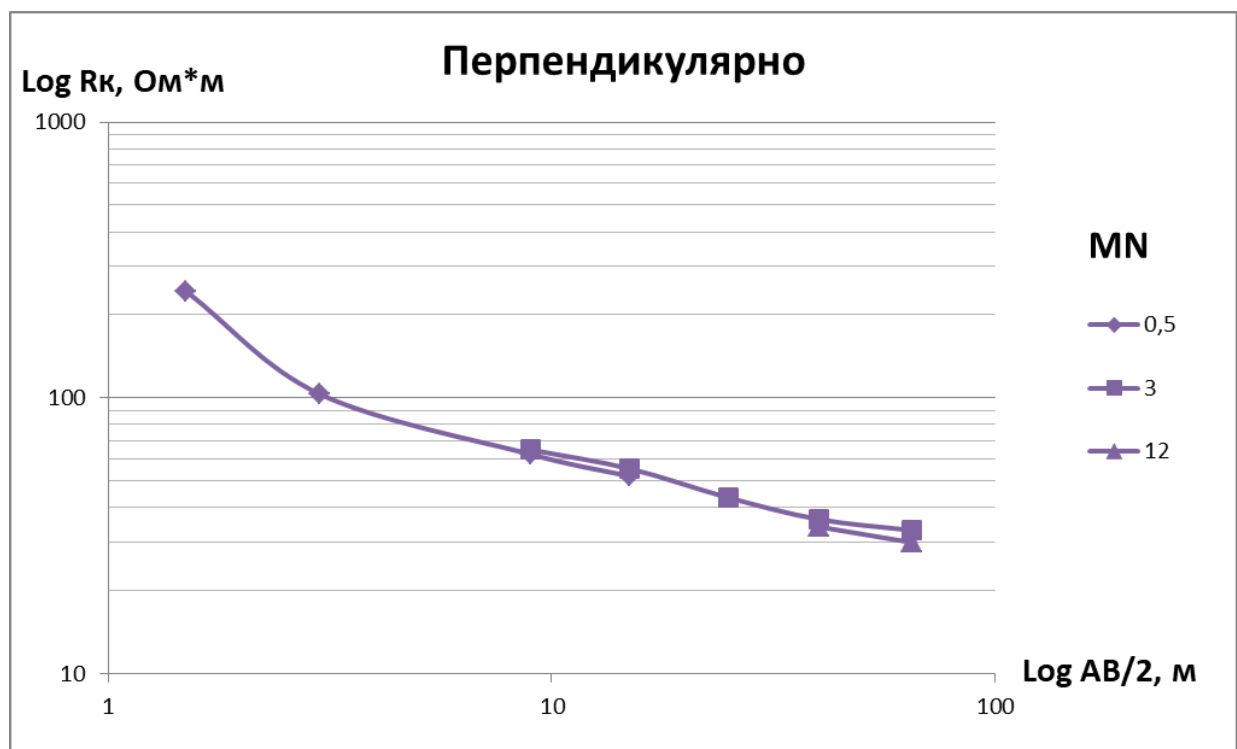


Рисунок 18: Результаты полевых измерений перпендикулярно железнодорожным рельсам. Разные фигуры точек соответствуют различным разносам MN.

5. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для облегчения анализа полученных в результате лабораторного моделирования данных они были представлены в виде графиков зависимости $(R_a/R)/Z$, аналогично тому, как это было сделано в работе (Wilkinson, 2006).

Параметр (R_a/R) показывает отношение измеренных значений кажущегося удельного сопротивления с проводником к значениям, измеренным без него. При отсутствии влияния проводника значение данного параметра будут стремиться к единице. Z – кажущаяся глубина исследования, численно равная $AB/6$.

На графиках $(R_a/R)/Z$ для эксперимента с параллельно расположенным проводником (рис. 19-20) можно заметить ряд особенностей. Влияние проводника увеличивается с увеличением разноса питающих электродов и, как следствие, увеличением кажущейся глубины.

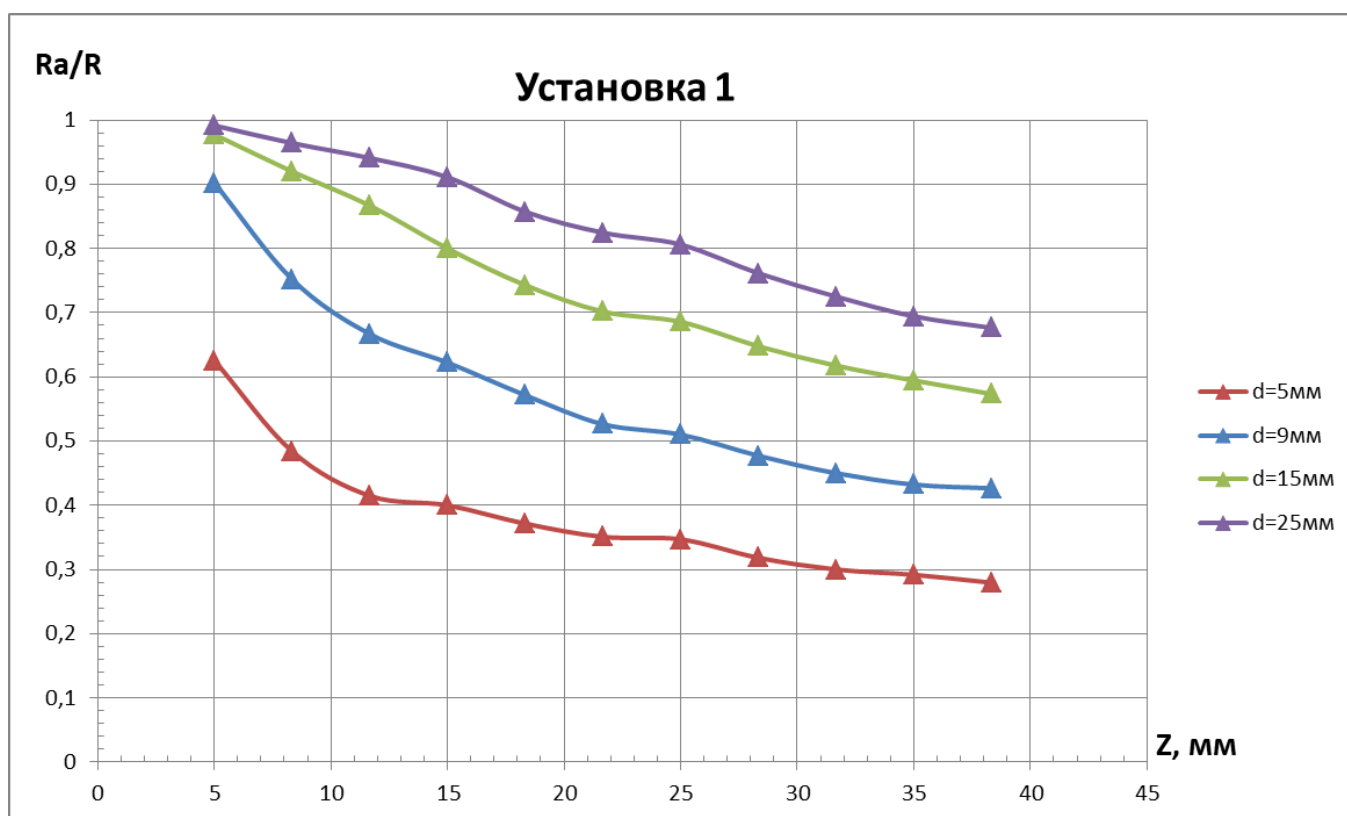


Рисунок 19: Графики $(R_a/R)/Z$ для эксперимента с параллельно расположенным проводником на первой установке.

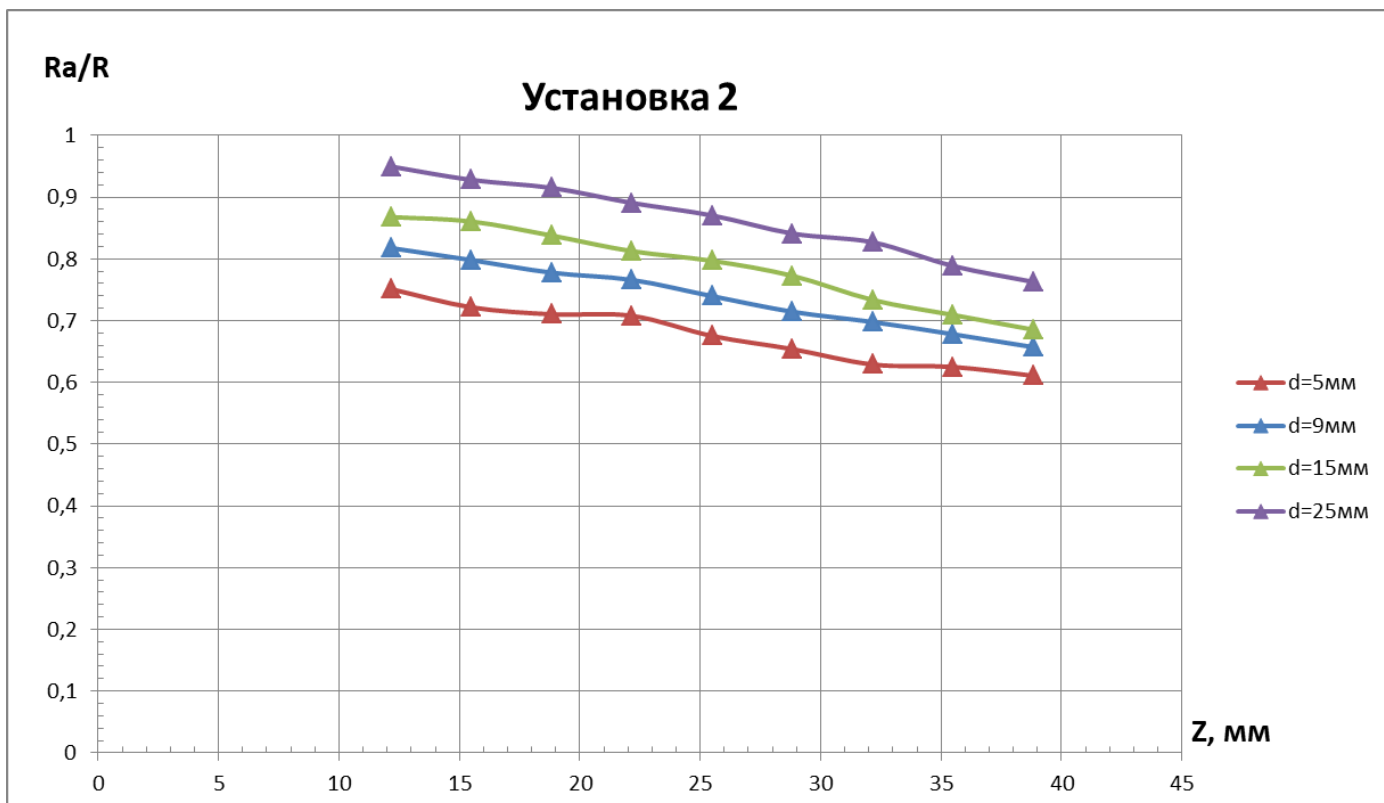


Рисунок 20: Графики $(R_a/R)/Z$ для эксперимента с параллельно расположенным проводником на второй установке.

Также можно заметить, что на одинаковых расстояниях на второй установке влияние проводника меньше, чем на первой, не смотря на использование на обеих установках одного и того же проводника. Это можно объяснить изменением поверхностной проводимости проводника из-за обработки при подготовке к эксперименту или окисления его поверхности, так как между экспериментами прошел достаточно большой промежуток времени.

На графиках $(R_a/R)/Z$ для экспериментов с перпендикулярно расположенным между электродами А и М проводником (рис. 21-22) отчетливо выделяется локальная аномалия пониженных сопротивлений. На первой установке проводник располагался посередине между 3 и 4 разносами питающего электрода А. На второй – посередине между 4 и 5 разносами электрода А. В обоих случаях аномально низкие значения показаны на трех ближайших к проводнику разносах питающих электродов, при этом максимум аномалии фиксируется на более удаленном от центра установке разносе. В обоих случаях величина аномалии не превышает 20%.

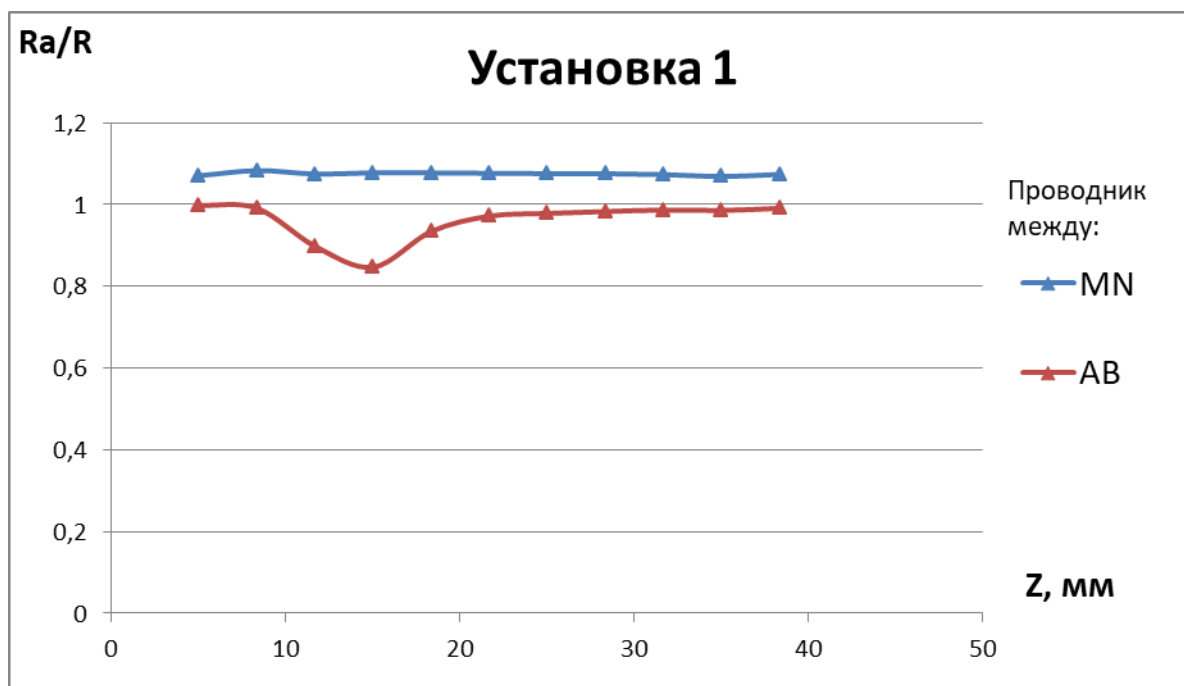


Рисунок 21: Графики $(R_a/R)/Z$ для эксперимента с перпендикулярно расположенным проводником на первой установке. На синем графике проводник расположен между приемными электродами, а на красном между приемным и питающим электродами.

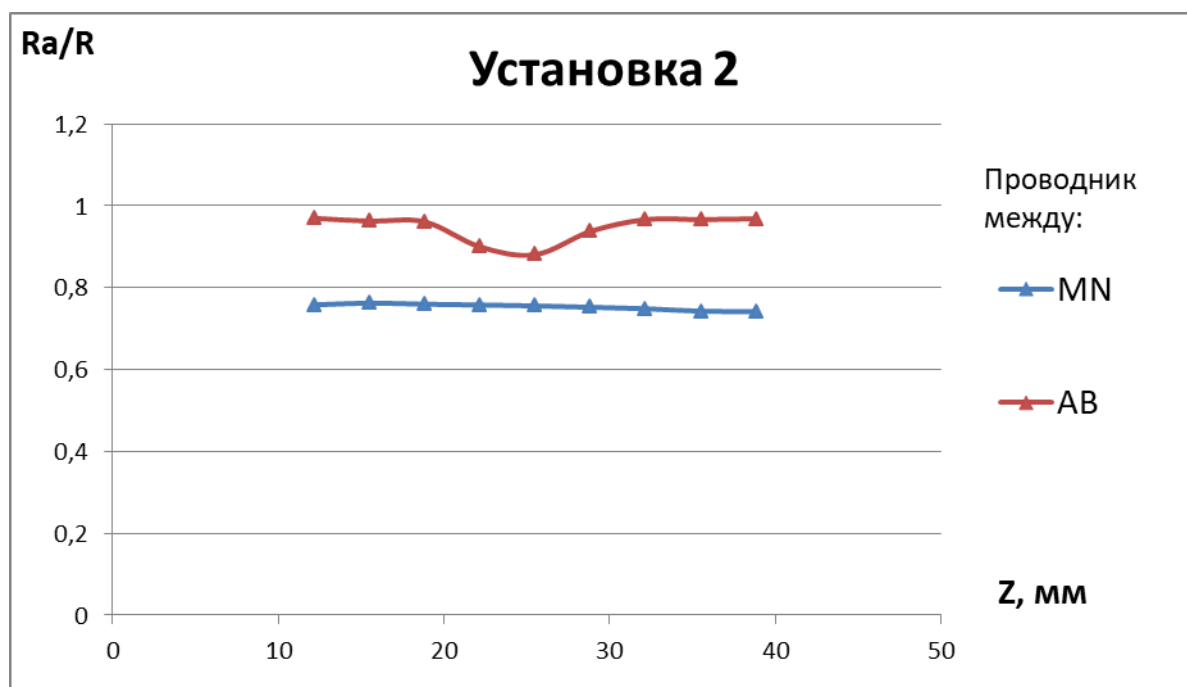


Рисунок 22: Графики $(R_a/R)/Z$ для эксперимента с перпендикулярно расположенным проводником на второй установке. На синем графике проводник расположен между приемными электродами, а на красном между приемным и питающим электродами.

На соответствующих графиках для экспериментов с расположением проводника между приемными электродами М и N хорошо видно, что величина смещения хоть и различна для разных установок (предположительно это можно объяснить различным взаимным расположением приемных электродов и проводника на первой и второй установках), но постоянна для каждой из них и не зависит от разности питающих электродов.

6. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РЕЗУЛЬТАТОВ ВЭЗ, ВЫПОЛНЕННЫХ В НОВОМ УРЕНГОЕ

Как показали результаты полевого эксперимента, железнодорожное полотно далеко не всегда влияет на результаты ВЭЗ, проведенных в непосредственной близости от него. Для подтверждения этого предположения был проведен статистический анализ типов кривых ВЭЗ, полученных при работе вдоль железной дороги в Новом Уренгое. Напомним, что все измерения в Новом Уренгое проводились параллельно железнодорожным путям. Измерения проводились с использованием генератора АСТРА-100 и измерителя SDG-EEM MEDUSA.

Для анализа были выбраны два километровых участка, на которых было снято 59 кривых ВЭЗ. Примеры типовых кривых приведены на рисунке 21.

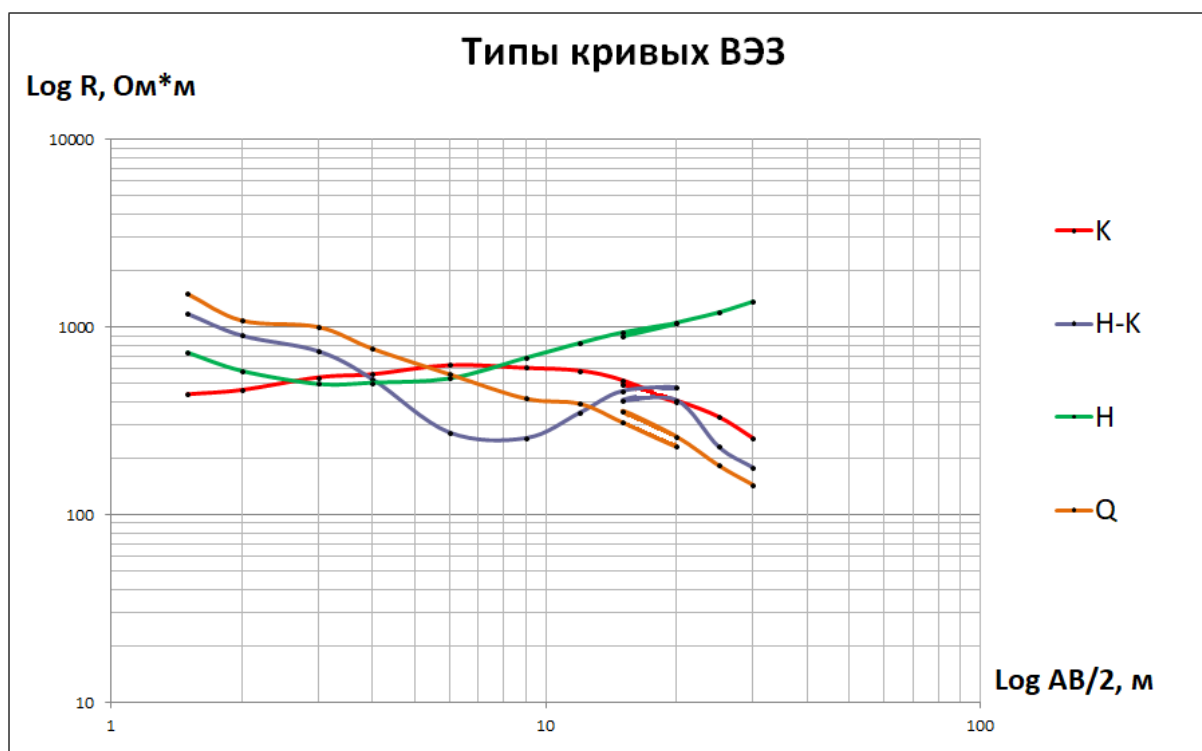


Рисунок 21. Примеры самых распространенных типов кривых, полученных в ходе работ в Новом Уренгое.

Было подсчитано, что лишь 73% кривых относятся к типу H и H-K, то есть содержат участки пониженного сопротивления, которые можно трактовать как возможное влияние проводящего рельса. Однако, это понижение сопротивления, как

правило, имеет локальный характер и происходит на разных разностях, что не согласуется с результатами моделирования при параллельном, на одном расстоянии, размещении проводника и линии измерения.

Таким образом, по результатам анализа можно сделать два вывода. Во-первых, 27% кривых определенно не были подвержены влиянию железной дороги, так как не содержат аномалий, которые она может вызвать. Во-вторых, не смотря на то, что большая часть уренгойских кривых содержат участки пониженного сопротивления, скорее всего, они связаны не с влиянием железной дороги, а с наличием в геологическом разрезе реальных проводящих слоев, так как не соответствуют характеру аномалий, вызванных близко расположенным линейным проводником.

Исходя из графиков зависимости величины аномалий от поверхностного сопротивления проводника, представленных Уилкинсоном (Wilkinson, 2006), можно предположить, что ключевым фактором, влияющим на наличие аномалии и ее величину, является сопротивление заземления рельса.

Исходя из этого предположения, планировалось провести серию экспериментов по моделированию частично заземленного линейного проводника, но, как уже было сказано выше, провести их не удалось из-за закрытия доступа в Университет в рамках карантинных мероприятий.

7. ВЫВОДЫ

По результатам проделанной работы можно сделать следующие основные выводы:

1. Влияние параллельно расположенного линейного проводника проявляется в понижении значений кажущегося сопротивления, проявляющемся на всех разносах питающих электродов и убывающим с увеличением расстояния между проводником и линией наблюдения. С увеличением разноса величина аномалии также увеличивается.

2. Влияние проводника, расположенного перпендикулярно между питающим и приемным электродами проявляется в виде локального понижения значений кажущегося сопротивления на ближайших к проводнику разносах питающих электродов.

3. Расположенный между приемными электродами перпендикулярный линии измерений линейный проводник оказывает влияние на измерения, проявляющееся в равномерном смещении значений кажущегося сопротивления. Смещение может происходить как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения значений кажущегося сопротивления. Величина смещения постоянна и не зависит от разноса питающих электродов.

4. Влияние проводящего рельса на результаты электроразведки на постоянном токе существенно зависит от сопротивления заземления рельса. При хорошей изоляции рельс не окажет влияния на результаты вертикальных электрических зондирований, выполняющихся в непосредственной близости от железнодорожного полотна. Для проверки наличия влияния железной дороги на результаты зондирований, выполняющихся параллельно железнодорожному полотну, можно рекомендовать проведение измерений на разном расстоянии от насыпи.

5. Полевой материал метода ВЭЗ, полученный при исследовании состояния железнодорожной насыпи в Новом Уренгое в 2019 г, является кондиционным.

8. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vickery A.C., Hobbs B.A., 2002. The effect of subsurface pipes on apparent-resistivity measurements; Geophysical Prospecting, 50 (1), pp 1-13.
2. Alhajj M.A., Palma-Lopes S., Villain G., 2019. Accounting for steel rebar effect on resistivity profiles in view of reinforced concrete structure survey. Construction and Building Materials, Vol. 223, pp.898-909.
3. Wilkinson P.B., 2005. Effects of a conductive rail on parallel apparent resistivity measurements. British Geological Survey Internal Report IR/06/096, pp 14.
4. Wait J.R., Umashankar K. R., 1983. Analysis of the Earth Resistivity Response of Buried Cables. Pageoph, Vol. 117 (1978/79), pp. 711.
5. Wait J.R., 1983. Resistivity Response of a Homogeneous Earth with a Contained Vertical Conductor. IEEE Transaction on geoscience and remote sensing, VOL GE-21, NO.1, pp. 109.

Выполнил: Таратынов П.С.

