

## Бесконтактные измерения в электроразведке методом сопротивлений; опыт математического моделирования

А.Д. Каринский<sup>1</sup>, В.А. Шевнин<sup>2</sup>, А.А. Иванов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), akarinski@mail.ru, biwolf@mail.ru.

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени Ломоносова (МГУ), shevninvlad@yandex.ru.

---

### АННОТАЦИЯ

В работе представлены полученные на основе решения прямой задачи электродинамики результаты численных расчётов для модели, соответствующей возможным условиям бесконтактных измерений в электроразведке методом сопротивлений. Приведены результаты моделирования для предельной дипольно-осевой установки, расположенной на небольшой высоте  $h$  над однородным проводящим полупространством. Расчёты выполнены при частоте 16 кГц, применённой в нескольких видах электроразведочной аппаратуры для бесконтактных измерений. Показано, что по сравнению с применяемой сейчас методикой при не очень высоком удельном электрическом сопротивлении проводящей среды более эффективным может быть определение значения кажущегося удельного электрического сопротивления  $\rho_k$  по реактивной составляющей напряжения электрического поля в измерительной линии  $MN$ , меняющейся синфазно с электрическим током  $I$  в токовой линии  $AB$ .

**Ключевые слова:** метод сопротивлений; бесконтактные измерения; моделирование

---

### ВВЕДЕНИЕ

В 70-х годах XX-го века были начаты исследования с целью обоснования возможности применения бесконтактных измерений в электроразведке методом сопротивлений. Необходимость применения такой модификации возникает при проведении измерений методами сопротивлений в зонах многолетнемерзлых пород, скальных грунтов, при наличии снежного покрова, либо, например, такого непроводящего искусственного покрытия, как асфальт или бетон. Кроме того, отсутствие необходимости заземления токовых ( $A, B$ ) и измерительных ( $M, N$ ) электродов позволяет значительно ускорить процесс измерений. Некоторые результаты таких исследований были опубликованы, например, в работах [Тимофеев, Бяшков, 1976], [Нахабцев и др., 1985].

### Методы

Теоретическое обоснование применения бесконтактных измерений и интерпретации получаемых результатов основывалось не на "строгом" решении соответствующей прямой задачи электродинамики, а на приближённых подходах. И, судя по недавним публикациям, положение с теоретическим обоснованием метода до сих пор существенно не изменилось. Например, часть работы [Груздев и др., 2020] посвящена обоснованию тех ограничений, которые имеет применяемая приближённая методика расчётов.

В этой работе представлены некоторые, полученные совсем недавно на основе "строгого" решения соответствующей прямой задачи электродинамики, результаты математического моделирования для расположенной на небольшой высоте  $h$  над однородным проводящим полупространством предельной дипольно осевой установки  $BAMN$ .

Очевидно, что проведение бесконтактных измерений в методах сопротивления возможно лишь при переменном токе  $I$  в питающей линии  $AB$ . Некоторые результаты математического моделирования при переменном токе  $I = I_0 \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)$  в электроразведке методом сопротивлений и каротаже КС, были приведены в работах [Kaufman et al, 1996], [Каринский, 1998], [Каринский, Шевнин, 2001, 2020, а, 2020, б]. В статье [Каринский, Шевнин, 2001] были приведены решение прямой задачи электродинамики и полученные на его основе результаты моделирования для случая, когда линия  $AB$  переменного тока лежит на поверхности "двухслойного" проводящего полупространства. Основой для получения решения задачи послужила методика, описанная в книге [Заборовский, 1960]. Эта же методика была применена при получении приведенных ниже результатов моделирования.

На рисунке 1 показана модель, для которой были проведены расчёты. Горизонтальная плоскость  $S$  разделяет полупространства  $V_1$  и  $V_2$ . Генераторный ( $AB$ ) и измерительный ( $MN$ ) диполи расположены в

полупространстве  $V_1$  на одной прямой, параллельной оси  $X$ , на высоте  $h$  над границей  $S$ . Компоненту  $E_x$  электрического поля  $\mathbf{E}$ , которой пропорционально напряжение  $E_{MN}$  поля  $\mathbf{E}$  в предельно короткой измерительной линии  $MN$ , определяет несобственный интеграл в смысле главного значения (см. [Альпин и др., 2020], с. 96-101). Подынтегральная функция содержит функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка. Приведенные на рисунках 2, 3 значения кажущегося удельного электрического сопротивления  $\rho_k(E_x)$  для предельной дипольно-осевой установки определены по формулам:  $\rho_k(E_x) = K \cdot |E_x| / I_0$ ,  $K = \pi x^3$ , где  $|E_x|$  - амплитуда компоненты  $E_x$ , а  $K$  - коэффициент расположенной на поверхности проводящего полупространства предельной дипольно-осевой установки.

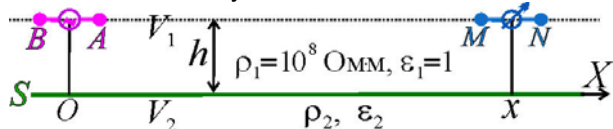


Рисунок 1. Модель среды и электроразведочной установки

### РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 2 представлены зависимости  $\rho_k(E_x)$  от разноса  $x$  при частоте  $f=16$  кГц, удельном электрическом сопротивлении  $\rho_2=100$  Ом·м и нескольких значениях высоты  $h$ . Заметим, что 16 кГц - это та "рабочая" частота, которая была выбрана для нескольких видов аппаратуры при бесконтактных измерениях в методах сопротивлений. При наших расчётах была задана диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_2=10$ . Хотя легко оценить то, что при частоте 16 кГц и значениях  $\rho_2$  менее первых десятков тысяч Ом·м выбор величины  $\epsilon_2$  - не существен, так как при любых, реальных для горных пород значениях  $\epsilon_2$  и  $\rho_2 < 10^4$  Ом·м можно пренебречь влиянием на результаты расчётов токов смещения в нижнем полупространстве.

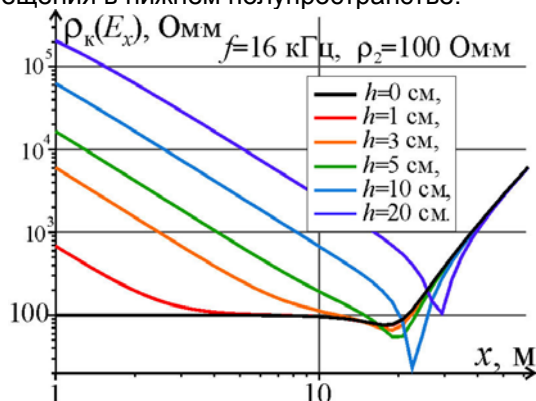


Рисунок 2. Зависимости  $\rho_k(E_x)$  от разноса  $x$  при нескольких значениях высоты  $h$

Полученные результаты моделирования показали, например, что при  $h=5$  см величина  $\rho_k \approx \rho_2$ , если разнос  $x \approx 15$  м. При  $h=20$  см значения  $\rho_k$  значительно больше  $\rho_2$  при любых разносах  $x$ . Если  $x > 25 - 30$  м, то значения  $\rho_k$  перестают зависеть от  $h$ . Это - известная при проведении измерений на переменном токе в методе ВЭЗ индукционная асимптота.

На рисунке 3 показаны зависимости  $\rho_k(E_x)$  от разноса  $x$  при фиксированной высоте  $h=5$  см (а) и  $h=10$  см (б) и при трёх значениях удельного электрического сопротивления  $\rho_2$ . Из приведенных на этом рисунке результатов моделирования следует, что при частоте 16 кГц, указанных выше высотах  $h$  и разносах  $x$  порядка 10-й - 20-и метров величина  $\rho_k \approx \rho_2$  только при "достаточно высоких" значениях  $\rho_2$  (порядка 1000 Ом·м, как на рисунке 3, или более). При более низких значениях  $\rho_2$  (часто типичных для верхней части геологического разреза "немёрзлых" осадочных горных пород) значения  $\rho_k$  могут не иметь "тесной связи" с удельным электрическим сопротивлением  $\rho_2$ .

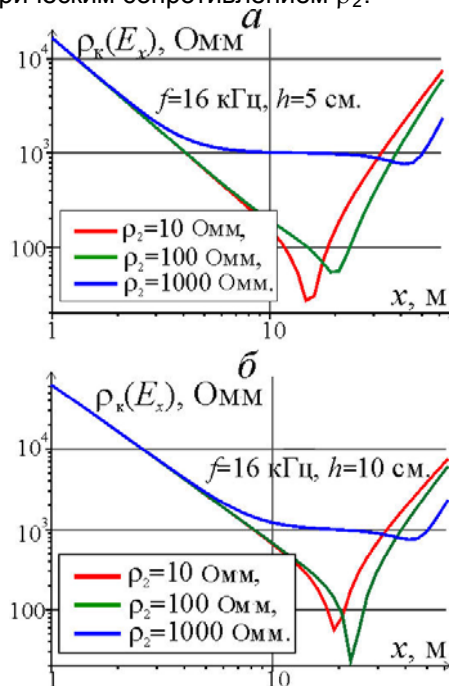
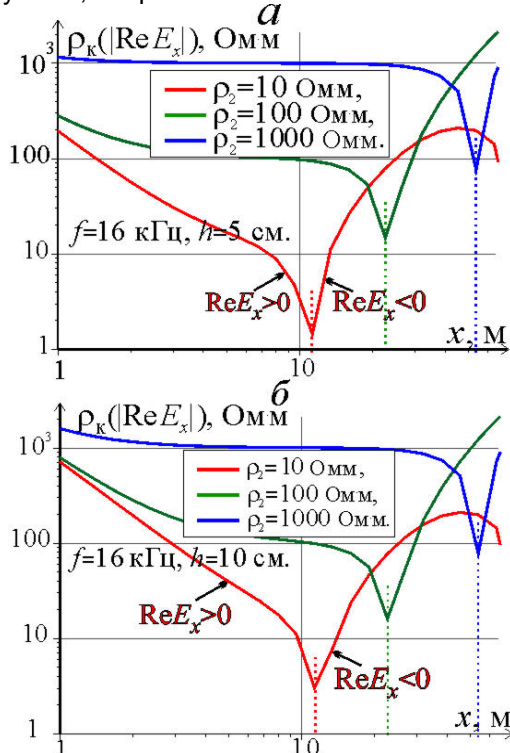


Рисунок 3. Зависимости  $\rho_k(E_x)$  от разноса  $x$  при нескольких значениях  $\rho_2$

Значения  $\rho_k(|\text{Re } E_x|)$  на рисунке 4 определены по амплитуде  $|\text{Re } E_x|$  реактивной составляющей  $\text{Re } E_x = E_x \cdot \cos \varphi(E_x)$ , меняющейся синфазно, либо в противофазе, с током  $I$  в генераторном диполе  $AB$ . То есть  $\rho_k(|\text{Re } E_x|) = K \cdot |\text{Re } E_x| / I_0$ . Здесь  $\varphi(E_x)$  - начальная фаза компоненты  $E_x$ , либо (в более общем случае) разность фаз между компонентой  $E_x$  и гармонически меняющимся током  $I$ . Некоторые особенности графиков на этом рисунке связаны с тем, что функция  $\text{Re } E_x(x)$  не является

знакопостоянной. Значения  $x$ , при которых составляющая  $\text{Re } E_x$  меняет знак, отмечены на этом рисунке вертикальными пунктирными линиями. Результаты расчётов, представленные на рисунке 4, а, получены при  $h=5$  см, а на рисунке 4, б при  $h=10$  см.

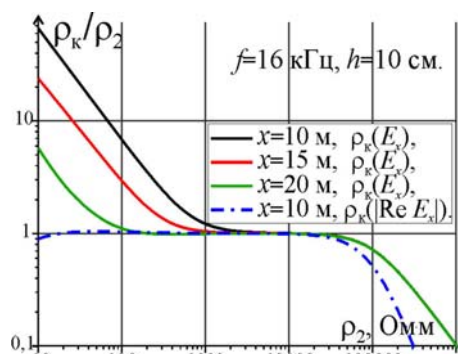


**Рисунок 4.** Зависимости  $\rho_k(|\text{Re } E_x|)$  от разноса  $x$  при нескольких значениях  $\rho_2$

При сравнении рисунка 4 с рисунками 2, 3 видно, что определение  $\rho_k$  по значению  $|\text{Re } E_x|$  при невысоких значениях  $\rho_2$  имеет явные преимущества по сравнению с определением  $\rho_k$  по величине  $|E_x|$ . В соответствии с рисунком 4 при заданной частоте  $f$  можно выбрать такой разнос  $x$ , чтобы при широких пределах изменения удельного электрического сопротивления  $\rho_2$  значения  $\rho_k(|\text{Re } E_x|)$  были близки к  $\rho_2$ , т.е. (применительно к показанной на рисунке 1 модели) эти значения  $\rho_k(|\text{Re } E_x|)$  характеризовали истинное удельное электрическое сопротивление проводящей среды. Из показанных на рисунке 4 результатов моделирования следует, что при частоте 16 кГц,  $h=5-10$  см и  $10 \text{ Ом}\cdot\text{м} \leq \rho_2 \leq 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  таким "оптимальным" является разнос  $x \approx 8-10$  м.

На рисунке 5 показано то, как зависит от удельного электрического сопротивления  $\rho_2$  отношение  $\rho_k/\rho_2$ . Понятно, что если это отношение близко к единице, то (применительно к показанной на рисунке 1 модели) величина  $\rho_k$  характеризует истинное удельное сопротивление  $\rho_2$  проводящей среды.

Сплошные линии отвечают случаю, когда величины  $\rho_k$  определены по амплитуде компоненты  $E_x$ . Видим, что при различных разносах  $x$  и невысоких значениях  $\rho_2$  эти величины  $\rho_k$  не отражают истинное удельное электрическое сопротивление проводящей среды. Например, при указанных на рисунке 5 значениях  $f, h$  и при  $x=10$  м эти значения  $\rho_k$  близки к  $\rho_2$  при пределах изменения  $\rho_2$  от первых тысяч Ом·м до десятков тысяч Ом·м. При больших разносах  $x$  эти пределы шире, но с увеличением разноса уменьшается "детальность исследования" верхней части разреза при электропрофилеировании методом сопротивлений. Кроме того, в этом случае есть «опасность выхода» на индукционную асимптоту.



**Рисунок 5.** Зависимости отношения  $\rho_k/\rho_2$  от удельного электрического сопротивления  $\rho_2$

Штрихпунктирной линией на рисунке 5 показана зависимость отношения  $\rho_k/\rho_2$  от  $\rho_2$  при определении  $\rho_k$  по реактивной составляющей  $\text{Re } E_x$  компоненты  $E_x$ . При тех значениях  $f$  и  $h$ , при которых были проведены расчёты, определённые по этой составляющей значения  $\rho_k$  близки к  $\rho_2$  при пределах изменения  $\rho_2$  от десяти Ом·м до первых десятков тысяч Ом·м. Это означает, что определение  $\rho_k$  по составляющей  $\text{Re } E_x$  может позволить значительно расширить возможности применения бесконтактной модификации электропрофилеирования в электроразведке

Заметим ещё, что anomalно низкие значения  $\rho_k$  при удельном электрическом сопротивлении  $\rho_2$  выше первых десятков тысяч Ом·м обусловлены влиянием на электромагнитное поле токов смещения в проводящем полупространстве. Не сложно оценить, что при частоте  $f=16$  кГц и диэлектрической проницаемости  $\epsilon_2=10$  амплитуды соответствующих компонент векторов плотности тока смещения и плотности тока проводимости одинаковы, если  $\rho_2 \approx 100000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

На рисунке 6 показаны зависимости  $\rho_k$

от высоты  $h$  при пределах изменения  $\rho_2$  от 20-и Ом·м до 500-от Ом·м. На этом рисунке высота  $h$  меняется от нуля до 30-и сантиметров. Показанные сплошными линиями значения  $\rho_k$  определены «традиционным» способом, а значения  $\rho_k$  на штрих-пунктирных линиях определены по синфазной току  $I$  реактивной составляющей  $\text{Re } E_x$ .

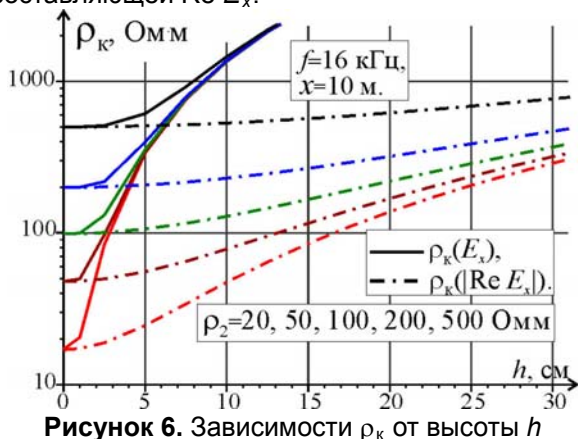


Рисунок 6. Зависимости  $\rho_k$  от высоты  $h$

В соответствии с полученными результатами моделирования, как нам кажется, не должно вызывать сомнений то, что при бесконтактных измерениях в электроразведке методом сопротивлений определение  $\rho_k$  по составляющей  $\text{Re } E_x$  (либо по составляющей напряжения  $\text{Re } E_{MN}$  электрического поля в "непредельной" электроразведочной установке) может позволить значительно расширить область применения бесконтактной модификации электропрофилеирования в электроразведке методом сопротивлений.

Отметим ещё, что в более близкой к реальности, чем показанная на рисунке 1, 1D- модели среды, содержащей несколько горизонтальных границ, при моделировании можно воспользоваться при численных расчётах всё тем же, применённым нами, алгоритмом. Но при этом надо уделить время решению системы  $(4n)$  алгебраических уравнений с  $(4n)$  числом неизвестных, где  $n$  - число плоско-параллельных (горизонтальных) границ, которые "содержит" 1D-модель среды.

#### Выводы

Проведено математическое моделирование для возможных условий при бесконтактных измерениях в электроразведке методом сопротивлений. Результаты моделирования показали, что при не очень высоких значениях удельного электрического сопротивления  $\rho_2$  проводящей среды при принятой методике определения кажущегося удельного электрического сопротивления  $\rho_k$  величины  $\rho_k$  значительно отличаются от  $\rho_2$ . В таких случаях целесообразно определять  $\rho_k$  по реактивной составляющей напряжения  $\text{Re } E_{MN}$

в измерительной линии  $MN$ , меняющейся синфазно с током  $I$  в генераторной линии  $AB$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

- Альпин Л. М., Даев Д. С., Каринский А. Д. Теория полей, применяемых в разведочной геофизике. Учебник для ВУЗов. Часть IV. Глава шестая "Переменное электромагнитное поле". Глава седьмая "Прямая задача теории переменного электромагнитного поля", 2020, 104 с. [Электронный ресурс/Текст]. <https://elibrary.ru/item.asp?id=43803479>.
- Груздев А. И., Бобачев А. А., Шевнин В. А. Определение области применения бесконтактной технологии метода сопротивлений. Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, издательство Изд-во Моск. ун-та (М.), 2020, № 5, с. 100-106.
- Заборовский А. И. Переменные электромагнитные поля в электроразведке. М., Изд-во МГУ, 1960, 186 с.
- Каринский А. Д. Решение осесимметричной прямой задачи теории каротажа КС при возбуждении поля переменным током. // Геофизика. 1998, № 2, С. 20-28.
- Каринский А. Д., Шевнин В. А. Влияние индукции на результаты ВЭЗ на переменном токе. // Геофизика. 2001, № 5, с. 50-56.
- Каринский А. Д., Шевнин В. А. К влиянию расстояния между линиями АВ и MN в методе вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ). В сборнике: Разведочная геофизика и геоинформатика. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2020. С. 37-41. <https://elibrary.ru/item.asp?id=42729946>
- Каринский А. Д., Шевнин В. А. Влияние кулоновой и индукционных составляющих электрического поля на результаты ВЭЗ на переменном токе. // Теория и практика разведочной и промышленной геофизики: сборник научных трудов / гл. ред. В. И. Костицын; Пермский государственный национальный исследовательский университет. Пермь, ноябрь 2020. 295 с. С. 117-123.
- Нахабцев А. С., Сапожников Б. Г., Яблчанский А. И., Электропрофилеирование с незаземленными рабочими линиями 1985. Л., Недра, 96 с.

Тимофеев В. М., Бяшков Г. П. О некоторых путях повышения эффективности электропрофилирования при инженерно-геокриологической съемке. – Тр. ВСЕГИНГЕО, вып. 81, 1976, с. 28-36.

Kaufman, A. A., Karinsky, A. D., Wightman, E. W., Influence of inductive effect on measurements of resistivity through casing // Geophysics. Vol. 61, 1996, Pp. 34-42.