

Бесконтактные измерения в электроразведке методом сопротивлений; опыт математического моделирования

А.Д. Каринский¹, В.А. Шевнин², А.А. Иванов¹

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

²Московский 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 ρ_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.

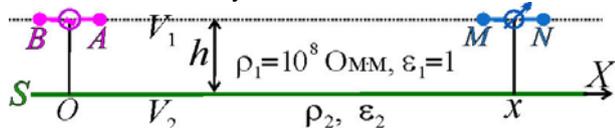


Рисунок 1. Модель среды и электроразведочной установки

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 ρ_2 менее первых десятков тысяч Ом·м выбор величины ϵ_2 - не существен, так как при любых, реальных для горных пород значениях ϵ_2 и $\rho_2 < 10^4$ Ом·м можно пренебречь влиянием на результаты расчётов токов смещения в нижнем полупространстве.

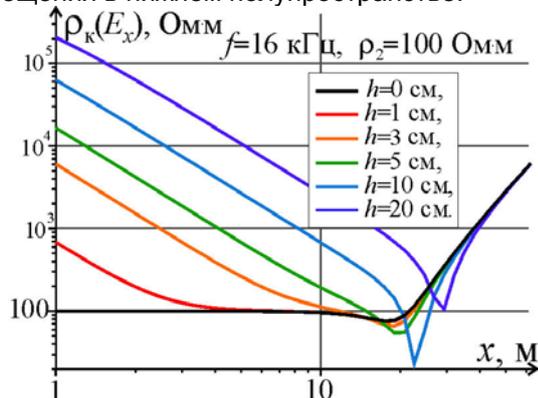


Рисунок 2. Зависимости $\rho_k(E_x)$ от разноса x при нескольких значениях высоты h

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 ρ_k значительно больше ρ_2 при любых разносах x . Если $x > 25 - 30$ м, то значения ρ_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 ρ_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 ρ_2 (порядка 1000 Ом·м, как на рисунке 3, или более). При более низких значениях ρ_2 (часто типичных для верхней части геологического разреза "немёрзлых" осадочных горных пород) значения ρ_k могут не иметь "тесной связи" с удельным электрическим сопротивлением ρ_2 .

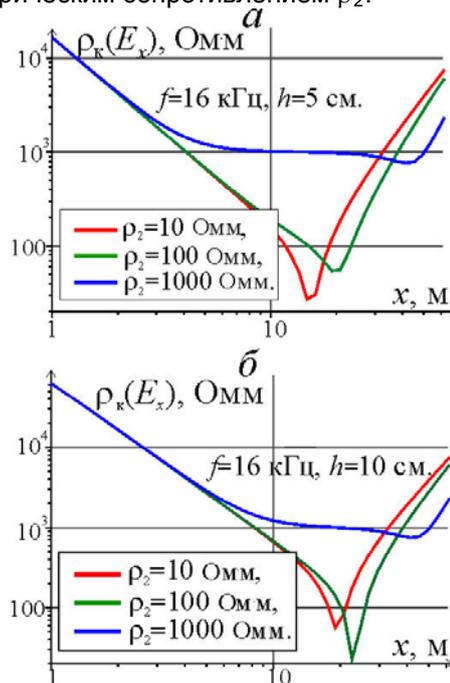


Рисунок 3. Зависимости $\rho_k(E_x)$ от разноса x при нескольких значениях ρ_2

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.

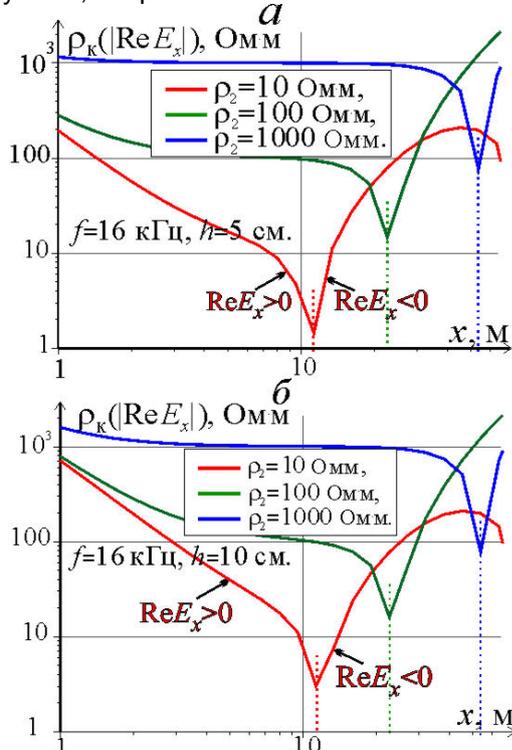


Рисунок 4. Зависимости $\rho_k(|\text{Re } E_x|)$ от разноса x при нескольких значениях ρ_2

При сравнении рисунка 4 с рисунками 2, 3 видно, что определение ρ_k по значению $|\text{Re } E_x|$ при невысоких значениях ρ_2 имеет явные преимущества по сравнению с определением ρ_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 ρ_2 значения $\rho_k(|\text{Re } E_x|)$ были близки к ρ_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 ρ_2 отношение ρ_k/ρ_2 . Понятно, что если это отношение близко к единице, то (применительно к показанной на рисунке 1 модели) величина ρ_k характеризует истинное удельное сопротивление ρ_2 проводящей среды.

Сплошные линии отвечают случаю, когда величины ρ_k определены по амплитуде компоненты E_x . Видим, что при различных разносах x и невысоких значениях ρ_2 эти величины ρ_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 ρ_k близки к ρ_2 при пределах изменения ρ_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.

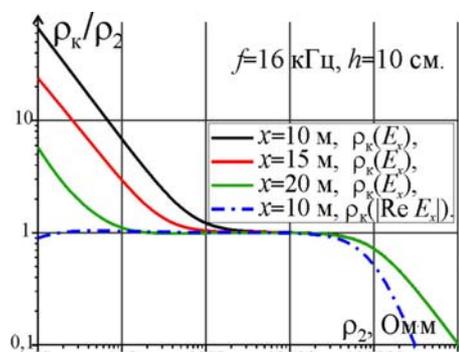


Рисунок 5. Зависимости отношения ρ_k/ρ_2 от удельного электрического сопротивления ρ_2

Штрихпунктирной линией на рисунке 5 показана зависимость отношения ρ_k/ρ_2 от ρ_2 при определении ρ_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 ρ_k близки к ρ_2 при пределах изменения ρ_2 от десяти Ом·м до первых десятков тысяч Ом·м. Это означает, что определение ρ_k по составляющей $\text{Re } E_x$ может позволить значительно расширить возможности применения бесконтактной модификации электропрофилеирования в электроразведке

Заметим ещё, что anomalно низкие значения ρ_k при удельном электрическом сопротивлении ρ_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 ρ_k

от высоты h при пределах изменения ρ_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 ρ_k определены «традиционным» способом, а значения ρ_k на штрих-пунктирных линиях определены по синфазной току I реактивной составляющей $\text{Re } E_x$.

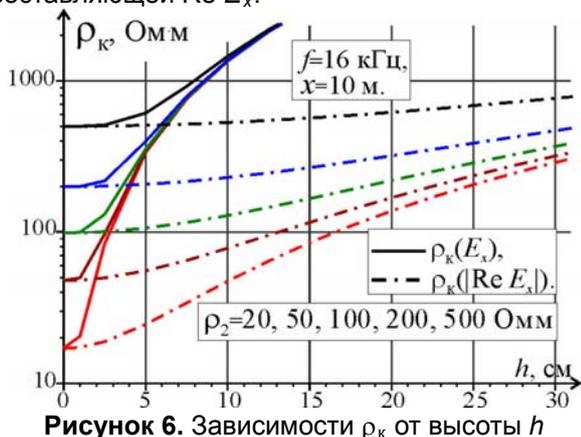


Рисунок 6. Зависимости ρ_k от высоты h

В соответствии с полученными результатами моделирования, как нам кажется, не должно вызывать сомнений то, что при бесконтактных измерениях в электроразведке методом сопротивлений определение ρ_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 ρ_2 проводящей среды при принятой методике определения кажущегося удельного электрического сопротивления ρ_k величины ρ_k значительно отличаются от ρ_2 . В таких случаях целесообразно определять ρ_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.