

Использование частотных данных для расчета индуктивно вызванной поляризации.

Е.В. Каршаков (ИПУ РАН), Е.В. Мойланен* (ИПУ РАН).

Введение

За последнее десятилетие чувствительность аэроэлектроразведочных (АЭР) систем значительно возросла, и все больше и больше авторов уделяют пристальное внимание эффекту вызванной поляризации (ВП), искажающей данные метода переходных процессов (МПП) (Chen et al., 2015; Kaminskiy and Viezzoli, 2017; Kwan et al., 2018). Наиболее распространенным подходом к описанию эффекта ВП является использование модели Cole-Cole, которая появилась в качестве эмпирического метода для анализа ВП в гальванических наземных измерениях (Cole and Cole, 1941). Во многих случаях это позволяет исключить эффект ВП или даже оценить кажущуюся поляризуемость. Например, Kaminskiy и Viezzoli (2017) опубликовали результаты успешной оценки поляризуемости, убедительно подтвержденной данными по измерениям в скважинах.

В то же время, Маспае и Нине (2016), сравнивая результаты измерений ВП, полученные традиционным наземным методом и аэрометодом, не показывают соответствия между расположениями аномалий поляризуемости по аэроданным и по данным наземных измерений. Вполне вероятно, что все рассматриваемые в их работе объекты, дающие аномалии ВП при наземных измерениях, отвечают существенно большим постоянным времени, чем измеряемые современными АЭР системами. Кроме того, авторы отмечают, что моделирование Cole-Cole с использованием установленных значений физических свойств для сульфидов показывает, что АЭР система нечувствительна к неоднородностям, отражающимся при измерениях традиционной ВП, когда размер минеральных вкраплений существенно меньше 1 мм.

Таким образом, нельзя утверждать, что индуктивно вызванная поляризация (ИВП), с которой мы имеем дело при АЭР измерениях, является решенной проблемой. Более того, мы не можем быть уверены, что параметры Cole-Cole, получаемые при интерпретации АЭР отражают истинные физические свойства. По этой причине новый подход к анализу ВП может представлять интерес.

В данной работе мы предлагаем проанализировать ИВП в частотной области. С одной стороны, сигналы в частотной области также подвержены влиянию ВП. С другой стороны, они могут предоставлять информацию об ВП в более удобной форме. Идея родилась при использовании вертолетной системы ЭКВАТОР (Moilanen et al., 2013), единственная система, предоставляющая данные как во временной (МПП), так и в частотной области. Karshakov et al. (2017) показали, насколько эффективной может быть совместная обработка измерений в частотной и во временной области при анализе удельного сопротивления. Так что, возможно, это может дать новый ключ к решению проблемы ИВП.

Мы не предлагаем строгой теории для обработки данных, осложненных ВП. Мы пытаемся переосмыслить суть явления на каких-то тривиальных моделях, надеясь получить качественно новое решение. Мы применили разработанный подход к АЭР данным, которые у нас есть.

ЭКВАТОР – это вертолетная система с буксируемым источником переменного магнитного поля. Измерительные рамки расположены на расстоянии 40 м от передатчика вдоль буксировочного кабеля. Выполняются непрерывные измерения, что позволяет применить к данным МПП быстрое преобразование Фурье (БПФ) для получения данных в частотной области. Частоты представляют собой несколько нечетных гармоник базовой частоты: $f_n = (2n - 1) \cdot 77$ Hz, $n = 1, 2, 3 \dots$ Эта система использовалась для нескольких объектов в России в районах, где широко представлена ИВП. Среди них участок в районе кимберлитовой трубки Амакинская, рассмотренный Viezzoli и Kaminskiy (2016). Все представленные в данной работе примеры относятся к этому региону.

Методы и результаты.

Рассмотрим первое уравнение Максвелла для электромагнитного поля в однородной среде для некоторой определенной частоты ω (Collett, 1959):

$$\nabla \times \mathbf{H} = (\sigma - i\omega\epsilon)\mathbf{E}, \quad (1)$$

где слева – ротор комплексного вектора амплитуд магнитного поля \mathbf{H} , σ – электропроводность, ϵ – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, i – мнимая единица, \mathbf{E} – комплексный вектор амплитуд электрического поля. В уравнении (1) ϵ – единственный параметр, который может привести к характерным для ИВП отрицательным значениям в откликах. Точнее, величина $i\omega\epsilon$ является единственным отличием от уравнений квазистационарного приближения, которое никак не описывает случай ВП.

Из представленных АЭР данных системы ЭКВАТОР (рис. 1) видно, что максимальный эффект ВП в частотной области представлен на частоте 2.7 кГц $\sim 1.7 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ или ниже. Средняя кажущаяся удельная электропроводность составляет около $3 \cdot 10^{-3} \text{ См/м}$. Для существенного влияния на измеряемые сигналы абсолютная диэлектрическая проницаемость должна быть порядка $\sigma/\omega \sim 1.7 \cdot 10^{-7} \text{ Ф/м}$. Но для естественных условий она вряд ли может превышать величину 10^{-9} Ф/м . Например, глины имеют максимальную диэлектрическую проницаемость $40 \cdot \epsilon_0 = 0.35 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/м}$ (Hubbard, 1997), где $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Таким образом, нет оснований рассматривать эффект ИВП как следствие диэлектрической проницаемости однородной среды. Очевидно, что источником ИВП является неоднородность среды. Например, это могут быть электрические емкости, образованные локальными трещинами, с воздухом в качестве диэлектрика, без какой-либо значимой диэлектрической проницаемости.

Предположим, что никакой электрической емкости нет. В этом случае электродвижущая сила и токи будут распределены так, как показано на рисунке 2. Высота передатчика здесь составляет 40 м. Хорошо видно, что токи в основном протекают на расстоянии от 20 до 30 м от оси диполя. Этот случай может быть представлен простой схемой, содержащей источник напряжения с электродвижущей силой E , катушку с индуктивностью L , которая напрямую связана с высотой полета, и резистор с сопротивлением R , которое зависит как от высоты полета, так и от удельной электропроводности пород (рис. 3а).

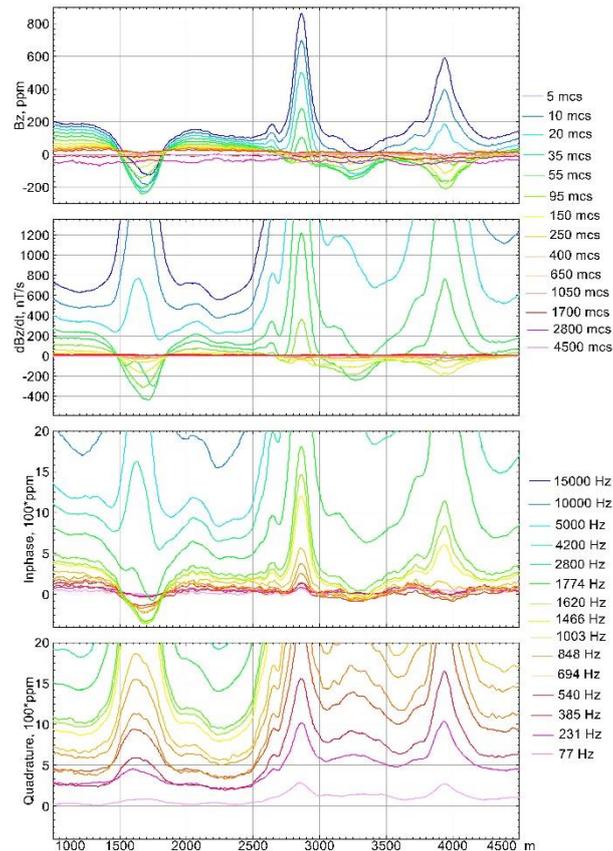


Рисунок 1. Сигналы, подверженные влиянию ВП: А) МПП dB/dt , б) синфазные компоненты в частотной области в) квадратурные компоненты в частотной области.

Как в свое время сделали Cole и Cole (1941), в полученную цепь можно добавить конденсатор с емкостью C . Мы предлагаем два принципиально разных способа сделать это: рисунок 3б и рисунок 3с. Конечно, есть и другие способы, но мы сосредоточимся на этих двух, чтобы проиллюстрировать основные особенности. Выпишем закон Ома для последовательного соединения:

$$E = I \left(R + i\omega L - \frac{i}{\omega C} \right), \quad (2)$$

где I - сила тока. В случае параллельного соединения:

$$E = I \left(R + i\omega L - \frac{iR_C}{\omega R_C C - i} \right), \quad (3)$$

где R_C – сопротивление, установленное параллельно с конденсатором. В уравнении (3) есть две асимптотики: $\omega R_C C \ll 1$ и $\omega R_C C \gg 1$. Первая позволяет пренебречь емкостью, поэтому в данном варианте нет эффекта ВП. Вторая приводит к уравнению (2).

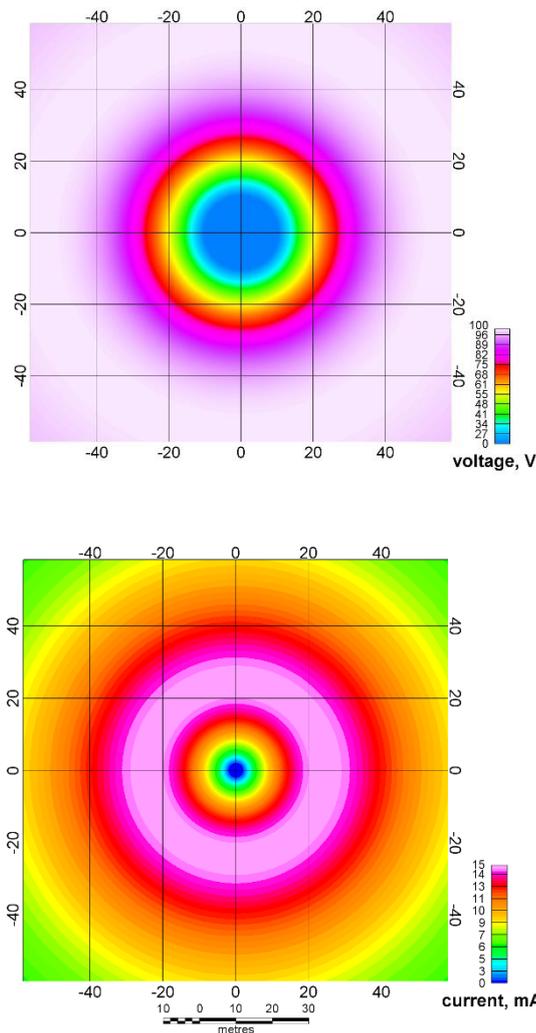


Рисунок 2. Распределение электродвижущей силы (вверху) и тока (внизу) для вертикального диполя 40 м над поверхностью, ось диполя проходит через точку (0,0).

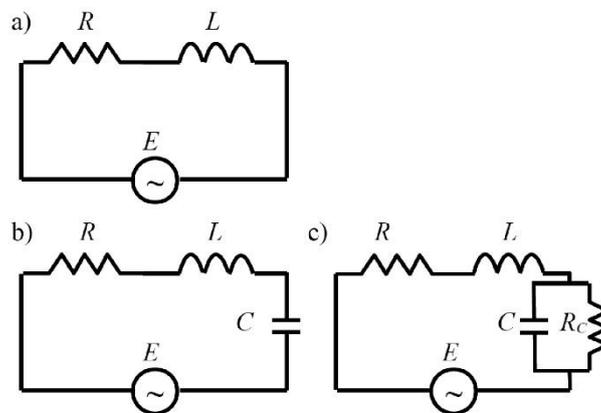


Рисунок 3. Принципиальные схемы для токов в среде на определенной частоте без конденсатора (a), с последовательно подключенным конденсатором (b), с параллельно подключенным конденсатором (c).

Главная особенность уравнения (2) состоит в том, что и емкость, и индуктивность дают только мнимую часть импеданса, в то время как сопротивление дает только действительную часть. Давайте перепишем (2):

$$\frac{E\bar{I}}{I^2} = \left(R + i\omega L - \frac{i}{\omega C} \right), \quad (4)$$

где \bar{I} - комплексное сопряжение I , $\text{Im } \bar{I} = -\text{Im } I$. Согласно закону Фарадея, электродвижущая сила E имеет фазу, равную 90° по отношению к первичному полю, поэтому, если первичное поле B_p действительно, $\text{Im } B_p = 0$, то $\text{Re } E = 0$, $\text{Im } E \sim \omega B_p$.

Согласно закону Ампера, вторичное поле B_s имеет ту же фазу, что и ток. В итоге можно записать:

$$\frac{k\omega B_p}{B_s^2} (i\text{Re}B_s + \text{Im}B_s) = \left(R + i\omega L - \frac{i}{\omega C} \right), \quad (5)$$

где k - действительное число, зависящее от положения передатчика и приемника относительно Земли.

Сопротивление R можно вычислить из действительной части уравнения (5):

$$R = \frac{k\omega B_p}{B_s^2} \text{Im}B_s. \quad (6)$$

Мы можем вычислить удельное сопротивление непосредственно из R , если мы знаем радиус витка с вихревым током и можем оценить площадь его сечения. Таким образом можно получить удельное сопротивление, свободное от влияния ВП! Более того, если мы можем вычислить соответствующий L , то можем и оценить емкость как частотно-зависимый параметр.

В соответствии с рисунком 2 мы попытались оценить L . Во-первых, мы получили кажущееся удельное сопротивление для заданной частоты из уравнения (6). Далее, мы предполагаем, что токи в основном представлены в верхних 5-10% скин-глубины для соответствующей частоты и удельного сопротивления. После того, как мы вычислили L , подставив размеры витка, мы можем найти C из мнимой части уравнения (5):

$$\frac{1}{\omega C} = \omega L - \frac{k\omega B_p}{B_s^2} \text{Re}B_s. \quad (7)$$

Конечный результат для частоты 848 Гц представлен на рисунке 4. Расчетное удельное сопротивление, а также кажущееся удельное сопротивление, основанное на квадратурной составляющей, не зависят от высоты полета. В то же время кажущееся удельное сопротивление выглядит так же, как и расчетное. По-видимому, квадратурная составляющая отклика в частотной области меньше подвержена влиянию ИВП, чем синфазная. Импеданс конденсатора (средний график) обозначает область влияния ИВП.

Для более общего уравнения (3) часть импеданса, связанная с емкостью, может иметь любую фазу от 0° до -90° . К сожалению, это главное разочарование – нам нужно больше одной частоты, чтобы исключить ИВП. В этом случае предложенный подход не вполне адекватен, поскольку токи на разных частотах могут иметь разную геометрию. Но все же, если нам удалось рассчитать емкость, как это было описано выше, мы можем надеяться, что рассчитанное из уравнения (6) значение меньше зависит от ИВП.

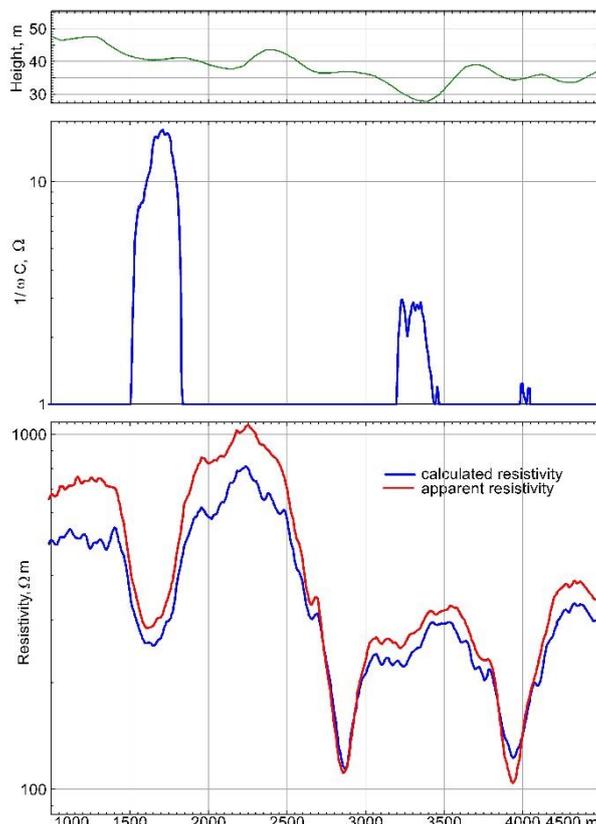


Рисунок 4. Расчетное удельное сопротивление по отношению к кажущемуся удельному сопротивлению для 848 Гц (нижние графики), расчетное сопротивление конденсатора (средний график) и высота передатчика (верхний график).

Выводы

На текущей стадии работы мы можем сформулировать следующие выводы:

1. Анализ откликов в частотной области существенно отличается от таковых во временной области.
2. Квадратурная и синфазная компоненты ведут себя по-разному по отношению к ИВП.
3. Для упрощенной модели последовательного соединения емкости, индуктивности и сопротивления удалось получить значение сопротивления, которое слабо подвержено влиянию ИВП.
4. Сопоставление кривых кажущихся сопротивлений, вычисленных методом, предложенным в работе, и только через квадратурную компоненту, показывает, что значения сопротивлений достаточно похожи. Можно предположить, что квадратурная компонента в меньшей степени подвержена влиянию ИВП.
5. Требуется дальнейшие исследования, чтобы получить оценки сопротивления и емкости для более общего случая (рис 3с).

Благодарности

Авторы выражают глубочайшую признательность Волковицкому А.К. за ценные советы и замечания.

Библиография

- Chen, T., Smiarowski, A., and Hodges, G., 2015, Understanding airborne IP: First European Airborne Electromagnetic Conference, EAGE, Extended Abstracts.
- Cole, K.S., and Cole, R.H., 1941, Dispersion and absorption in dielectrics. I. Alternating current characteristics: *Journal of Chemical Physics*, 9, 341-351.
- Collett, L.S., 1959, Laboratory investigation of overvoltage, in *Overvoltage research and Geophysical applications*: J. R. Wait, Ed., New York, Pergamon Press.
- Hubbard, S.S., Peterson, J.E., Majer, E.L., Zawislanski, P.T., Williams, K.H., Roberts, J., and Wobber, F., 1997, Estimation of permeable pathways and water content using tomographic radar data: *The Leading Edge*, 16(11), 1623-1628.
- Kaminskiy, V. and Viezzoli, A., 2017, Modelling induced polarisation effects in helicopter time-domain electromagnetic data: Field case studies: *Geophysics*, 82(2), 1-13.
- Karshakov, E., Podmogov, Y., Kertsman, V. and Moilanen, J., 2017, Combined frequency domain and time domain airborne data for environmental and engineering challenges: *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 22(1), 1-11.
- Kwan, K., Legault, J., Johnson, I., Prikhodko, A., and Plastow, G., 2018, Interpretation of Cole-Cole parameters derived from helicopter TDEM data – Case studies: SEG Annual Meeting and Exhibition, Anaheim, Extended Abstracts, 1-6.
- Macnae, J., and Hine, K., 2016, Comparing induced polarisation responses from airborne inductive and galvanic ground systems: *Tasmania: Geophysics*, 81(6), E471-E479.
- Moilanen, J., Karshakov, E. and Volkovitsky, A., 2013, Time domain helicopter EM system “Equator”: resolution, sensitivity, universality: 13th SAGA Biennial @ 6th International AEM Conference, Extended Abstracts, 1-4.
- Viezzoli, A., and Kaminski, V., 2016, Airborne IP: examples from the Mount Milligan deposit, Canada, and the Amakinskaya kimbrelite pipe, Russia: *Exploration Geophysics*, 47(4), 269-278.

References

- Chen, T., Smiarowski, A., and Hodges, G., 2015, Understanding airborne IP: First European Airborne Electromagnetic Conference, EAGE, Extended Abstracts.
- Cole, K.S., and Cole, R.H., 1941, Dispersion and absorption in dielectrics. I. Alternating current characteristics: *Journal of Chemical Physics*, 9, 341-351.
- Collett, L.S., 1959, Laboratory investigation of overvoltage, in *Overvoltage research and Geophysical applications*: J. R. Wait, Ed., New York, Pergamon Press.
- Hubbard, S.S., Peterson, J.E., Majer, E.L., Zawislanski, P.T., Williams, K.H., Roberts, J., and Wobber, F., 1997, Estimation of permeable pathways and water content using tomographic radar data: *The Leading Edge*, 16(11), 1623-1628.
- Kaminskiy, V. and Viezzoli, A., 2017, Modelling induced polarisation effects in helicopter time-domain electromagnetic data: Field case studies: *Geophysics*, 82(2), 1-13.
- Karshakov, E., Podmogov, Y., Kertsman, V. and Moilanen, J., 2017, Combined frequency domain and time domain airborne data for environmental and engineering challenges: *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 22(1), 1-11.
- Kwan, K., Legault, J., Johnson, I., Prikhodko, A., and Plastow, G., 2018, Interpretation of Cole-Cole parameters derived from helicopter TDEM data – Case studies: SEG Annual Meeting and Exhibition, Anaheim, Extended Abstracts, 1-6.
- Macnae, J., and Hine, K., 2016, Comparing induced polarisation responses from airborne inductive and galvanic ground systems: *Tasmania: Geophysics*, 81(6), E471-E479.

Moilanen, J., Karshakov., E. and Volkovitsky, A., 2013, Time domain helicopter EM system “Equator”: resolution, sensitivity, universality: 13th SAGA Biennial @ 6th International AEM Conference, Extended Abstracts, 1-4.

Viezzoli, A., and Kaminski, V., 2016, Airborne IP: examples from the Mount Milligan deposit, Canada, and the Amakinskaya kimberlite pipe, Russia: Exploration Geophysics, 47(4), 269-278.