

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА ИНДУКТИВНО ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ЧАСТОТНЫХ ДАННЫХ АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

Хлюстов Д. К.¹

(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Аэроэлектроразведка является одним из распространенных методов сбора геофизической информации. В процессе исследования территории с летательного аппарата собираются данные магнитного отклика среды в ответ на сигнал контролируемого источника электромагнитных волн. Во многих случаях для моделирования откликов достаточно построить простую модель разреза, имеющую действительные кажущиеся удельные сопротивления. Однако порой на данные существенное влияние оказывает эффект вызванной поляризации. Он выражается в зависимости кажущегося сопротивления среды от частоты сигнала. Классический подход к моделированию ВП заключается в построении модели для частотно-зависимого удельного сопротивления каждого из слоев среды. Однако количество параметров при таком подходе быстро растет с увеличением разрешения, в связи с чем задача инверсии становится некорректной. Отсутствие однозначного решения обратной задачи приводит к тому, что итоговый результат интерпретации данных сильно зависит от используемого начального приближения и априорной информации. В данной работе предлагается подход к решению этой проблемы, который применяется для инверсии реальных данных. Показывается, что в некоторых случаях начальное приближение может быть выбрано исходя из результатов анализа откликов, полученных на участке, близком участку ВП.

Ключевые слова: аэроэлектроразведка, фильтр Калмана, вызванная поляризация.

1. Введение

Аэроэлектроразведка широко применяется для поисков полезных ископаемых и картирования подземных инженерных конструкций [15]. Причиной этому является высокая скорость получения данных: летательный аппарат способен произвести исследование обширных территорий за небольшое время. Кроме того, аэроэлектроразведка применима на территориях, недо-

¹ Дмитрий Кириллович Хлюстов, аспирант (hlustov.d@gmail.com).

ступных для исследования наземными методами ввиду сложных природных условий.

Как правило, аэроэлектроразведочная система состоит из передатчика и приемника, расположенных на летательном аппарате. Передатчик излучает электромагнитный импульс с заданными характеристиками, приемник фиксирует вторичное поле отклика среды. На основании полученных данных строится модель среды, смоделированные отклики которой аппроксимируют реальные данные.

Эффекту вызванной поляризации (ВП) посвящено большое количество исследований в области обработки данных аэроэлектроразведки [11, 12, 17]. Причина этого заключается в том, что на практике часто оказывается невозможным получить физически адекватные результаты инверсии данных без учета ВП [6, 7].

Модели данного эффекта можно разделить на две группы. Согласно одним, ВП является проявлением особых свойств некоторых минералов. Работа [4] посвящена созданию материалов, обладающих свойством накопления заряда. Лабораторные эксперименты показывают, что в присутствии неоднородностей (к примеру, гранулярной структуры) среда может обладать частотно-зависимым сопротивлением. Согласно же альтернативной точке зрения, эффект ВП обусловлен в первую очередь геометрическими характеристиками поверхности (такими как трещиноватость) [3].

Следует отметить, что часто эффект ВП проявляется лишь при условии достаточной плотности частотного спектра аэрогеофизической системы. Немалое значение имеет и высота полета [9].

На рис. 1 приведены результаты обработки данных системы ЭКВАТОР, проводящей съемку на 25 частотах, и системы ЕМ4Н, имеющей лишь 4 частоты в спектре, в двух вариантах: самолетном (с большой высотой полета) и вертолетном (с меньшей высотой).

Высокие контрасты сопротивлений в правой части разреза обусловлены эффектом ВП. При этом в данных системы ЭК-

ВАТОР они наиболее заметны, а в данных самолетного варианта ЕМ4Н практически не видны.

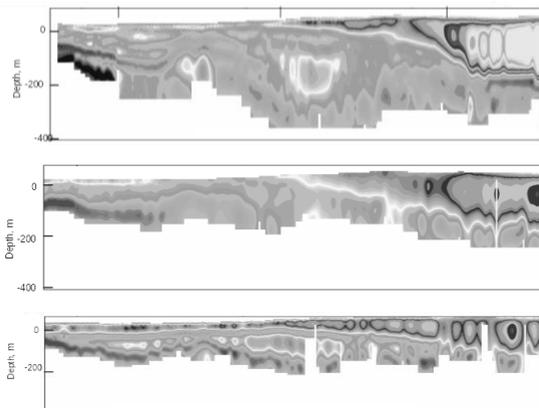


Рис. 1. Результаты инверсии данных системы ЭКВАТОР (сверху), самолетного (в середине) и вертолетного варианта ЕМ4Н

Данному факту можно дать несколько объяснений. Во-первых, плотная сетка частот позволяет с большей вероятностью уловить воздействие ВП, которое имеет характерный диапазон времени проявления. Кроме того, интенсивность эффекта вызванной поляризации зависит от высоты летательного аппарата, а потому данные самолетной системы практически ему не подвержены.

Одним из главных индикаторов ВП являются отрицательные значения отклика во временной области или же отрицательные значения синфазной компоненты отклика – в частотной [7]. В первой части представленной работы показано, что модель на основе формулы Cole-Cole [2] позволяет получить отклик с такими характеристиками. После этого приводится подход к инверсии, представляющий собой компромисс между числом параметров и качеством описания данных. В конце показаны результаты применения данного подхода для инверсии

реальных данных, которые сравниваются с классической моделью без учета накопления заряда.

Все вычисления проводятся в частотной области. Параметры системы, такие как частоты, типичная высота и относительное местоположение передатчика и приемника, соответствуют параметрам реальной аэроэлектроразведочной системы ЭКВАТОР [14]. Данная система способна проводить съемки как в частотной, так и во временной области. Однако в настоящей работе исследуются лишь частотные данные, поскольку частотнозависимое сопротивление в этой области имеет более наглядную интерпретацию.

2. Методы решения задачи

При вычислении кажущегося сопротивления среды часто используется так называемая горизонтально слоистая модель [20]. Подобное упрощение структуры позволяет снизить объем необходимых вычислений, в то же время обеспечивая высокую точность аппроксимации данных [5, 10]. Данная модель позволяет в явном виде выписать значения вторичного поля в ответ на излучение вертикального магнитного диполя. Для фиксированной частоты вертикальная компонента отклика равна

$$(1) \quad H_z(\omega) = \int_0^\infty u(n_0, z, h_T, \omega) J_0(n_0 r) n_0^2 dn_0,$$

где J_0 – функция Бесселя первого рода нулевого порядка; r – горизонтальное смещение приемника относительно диполя; h_T – высота диполя над поверхностью земли; z – высота приемника. Двумерный спектр потенциала вторичного поля задается формулой

$$(2) \quad u(n_0, z, h_T, \omega) = \frac{M \exp(-n_0(z+h))}{2} \frac{n_1 - n_0 R}{n_1 + n_0 R},$$

где M – дипольный момент; R – приведенный спектральный импеданс среды. Для K слоев его значение задается формулой

$$(3) \quad R^0 = \tanh \left(n_1 h_1 + \dots \tanh^{-1} \left(n_{K-1} h_{K-1} + \tanh^{-1} \frac{n_{K-1}}{n_K} \right) \right).$$

$$(4) \quad n_k = \sqrt{n_0^2 - \frac{i\omega\mu_0}{\rho_k}}, \quad \operatorname{Re} n_k > 0.$$

Здесь $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м – диэлектрическая проницаемость вакуума; ρ_k – сопротивление k -го слоя.

Одним из возможных методов решения обратной задачи (оценивания сопротивления и толщины каждого слоя) является фильтр Калмана. Поскольку задача нелинейна, необходимо использовать его модификацию – обобщенный итерационный фильтр [1, 8]. Поскольку данные методы используют численные оценки градиента, получить строгие теоретические результаты о сходимости процесса в общем виде не представляется возможным. Поэтому зачастую при работе с реальными данными оказывается необходимо запускать фильтр с разными начальными значениями и параметрами. Как правило, при обработке реальных данных начинают с простейшей модели однородного полупространства, сопротивление которого подбирается фильтром. После этого полученная модель используется в качестве стартовой для расширенной модели, содержащей несколько десятков слоев. Кроме того, для получения физически значимых результатов модель однородного полупространства подбирается лишь по данным откликов на самой низкой частоте, что соответствует слоям породы, обладающим наибольшей относительной мощностью. Оценка параметров расширенной модели производится уже с использованием всех доступных данных.

Алгоритм фильтра Калмана требует задания нескольких матриц в качестве параметров. В данной статье матрица шумов измерений R оценивалась по результатам компенсации (измерения естественного поля местности на большой высоте), матрица вариации параметров Q задавалась вручную так, чтобы обеспечить возможность значительного изменения оцениваемых величин. Матрица F полагалась единичной, что отражает факт отсутствия априорной информации о строении разреза. Матрица H вычисляется в ходе работы алгоритма на основании оценки якобиана [8]. Вектор измерений z формируется из измеренных значений откликов для рабочих частот системы (от 77 Гц до 15 кГц).

Приведенные выше формулы являются прямыми следствиями уравнений Максвелла. С математической точки зрения сопротивления могут быть комплексными или даже частотно-зависимыми.

Часто при изучении эффекта ВП сопротивления моделируются при помощи формулы Cole-Cole [17]:

$$(5) \quad \rho = \rho_0 \left(1 - m \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right),$$

где ρ_0 – сопротивление среды при постоянном токе; m – параметр заряжаемости; τ – время релаксации; c – константа фазового сдвига. Изначально подобные уравнения появились в работах, посвященных медленным электромагнитным процессам (таким как процессы электрохимии), однако позже нашли применение и в других областях, таких как аэроэлектроразведка. Уравнение Cole-Cole не единственное, применяющееся для описания эффекта ВП [3], однако альтернативные модели содержат еще большее число параметров [13].

При изучении источников было выяснено, что формула (4) допускает как «+», так и «-» под корнем. При этом в англоязычной литературе чаще выбирается «+» [16, 18, 19], а в русскоязычной – «-» [15, 20]. В случае действительных значений сопротивления изменение знака влияет лишь на положительность действительной компоненты отклика, оставляя его форму постоянной. Однако при переходе к комплексным сопротивлениям знак становится существенным. В частности, численное решение оптимизационной задачи

$$(6) \quad \Re H_z(\omega) \rightarrow \min,$$

где $\Re H_z(\omega)$ обозначает действительную компоненту отклика для частоты ω , показывает, что при выборе под корнем знака «-» классическая формула Cole-Cole не позволяет получить отрицательных откликов. На рис. 2 представлены графики зависимости от частоты действительной компоненты отклика при выборе различных знаков. Видно, что в варианте с «-» отклики не пересекают горизонтальную ось.

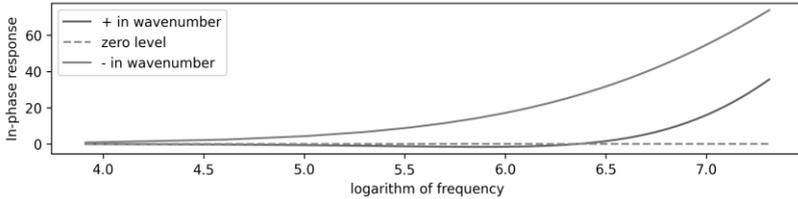


Рис. 2. Действительная компонента отклика однородного полупространства для разных значений знака волнового числа

Следует заметить, что функция $(i\omega\tau)^c$ является многозначной. В самом деле, $i = \exp\left(\frac{i*\pi}{2}\right) = \exp\left(i*\left(\frac{\pi}{2} + 2\pi k\right)\right)$ для целых k . После возведения в степень c мы получим $\exp\left(i\frac{c\pi}{2}\right)$, $\exp\left(i\frac{5c\pi}{2}\right)$... в качестве возможных значений.

При выборе под корнем в формуле (4) для моделирования отрицательных откликов необходимо использовать вторую ветвь степенной функции. В настоящей работе авторы придерживались именно такого подхода.

На рис. 3 показаны результаты моделирования отклика однородного полупространства с параметрами $\rho = 1000\Omega m$, $m = 0,5$, $\tau = 0,001$ с, $c = 0,5$. Показаны значения квадратурной и синфазной компонент, а также кривая затухания во временной области.

Индексом 0 обозначен отклик при выборе первой ветви степенной функции, индексом 1 – при выборе второй, NoIP соответствует среде без поляризации.

В случае когда все слои модели имеют сопротивления, определяемые формулой Cole-Cole, количество параметров растет очень быстро. Для того чтобы повысить корректность обратной задачи, необходимо ввести дополнительную регуляризацию. Часто в работах принимается предположение, что можно локализовать ВП в верхнем слое модели. Однако вопрос о том,

всегда ли можно подобрать модель, аппроксимирующую данные, не имея информации о реальном положении поляризующегося слоя, является открытым.

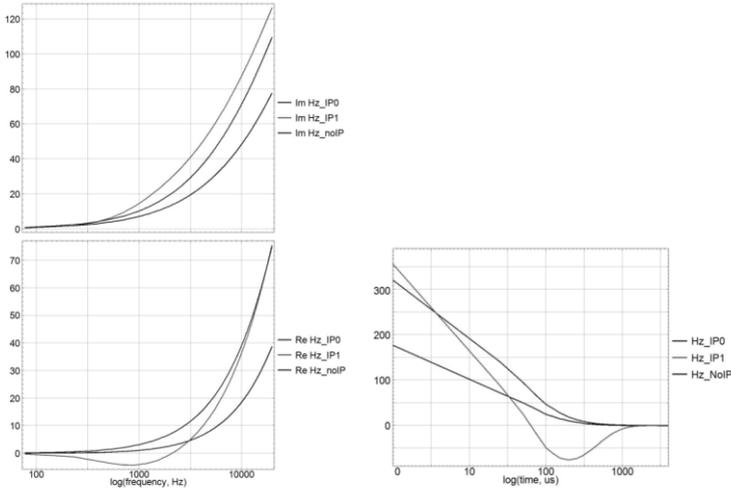


Рис. 3. Отклик однородного поляризующегося пространства

Рис. 4 показывает результаты сходимости алгоритма при подборе откликов синтетической двухслойной модели при различном расположении поляризации. Видно, что в частотных данных сходимость действительно наблюдается, даже если поляризация на самом деле содержится в нижнем слое, а моделируется в верхнем. Однако при переходе к временной области для малых значений толщины верхнего слоя подобная модель оказывается неспособна аппроксимировать отклики.

Ввиду вышесказанного вопрос о правильном определении положения поляризующихся слоев в модели можно считать открытым. Одним из возможных предположений является то, что эффект ВП сосредоточен в относительно небольшом (1–3) количестве слоев. Для нахождения этих слоев были подобраны параметры нескольких моделей, каждая из которых содержала ровно один поляризующийся слой.

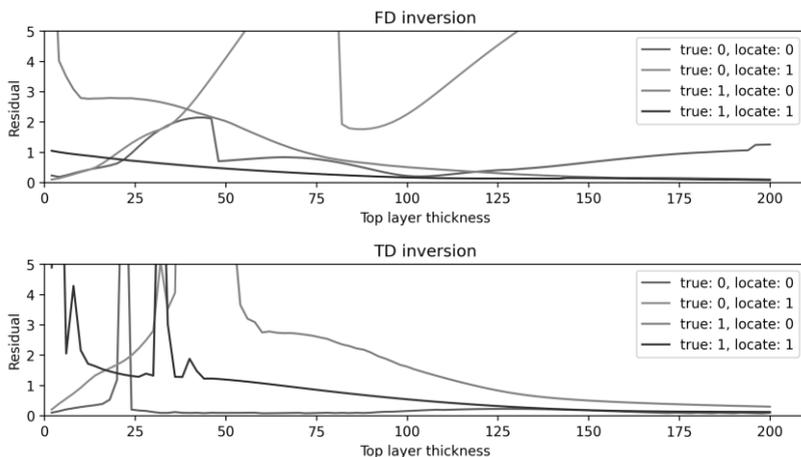


Рис. 4. Результаты сходимости алгоритма во временной и частотной области на двухслойной модели

При варьировании глубины залегания поляризующегося слоя был получен набор невязок между предсказаниями модели и реальными данными. Для некоторых значений глубины невязка оказалась существенно (в 5–10 раз) меньше, чем для других. Несмотря на то, что ее значения по-прежнему были слишком высоки, чтобы считать какую-либо из моделей хорошим приближением, при помощи этой процедуры удалось сделать выбор, сопротивления каких слоев считать частотно-зависимыми.

Данный метод применим лишь для небольших участков данных. Параметры моделей с одним поляризующимся слоем идентифицируются только при наличии хорошего начального приближения, в связи с чем необходимо регулярно повторять описанную процедуру.

3. Основные результаты

Здесь приведены результаты обработки реальных данных, полученных системой ЭКВАТОР. Данные содержат результаты измерений синфазной и квадратурной компонент для 15 частот от 77 до 15000 Гц. Инверсия производилась с помощью двадца-

типятислойной модели, с толщиной i -го слоя равной $4 \cdot 1,1085^i$. Невязка между измеренным откликом и результатом моделирования определялась по формуле

$$(7) \left(\sum_{freqs} \frac{(response_{estimated}(freq) - response_{true}(freq))^2}{\sigma_{noise}^2(freq)} \right)^{\frac{1}{2}},$$

пример графика невязки для модели с одним поляризующимся слоем приведен на рис. 5.

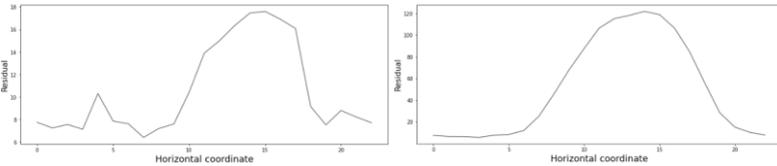


Рис. 5. Значения невязки для модели с поляризуемостью в слоях 2 и 5

Из рисунка видно, что введение частотно-зависимого сопротивления во втором слое позволяет снизить невязку значительно сильнее, чем в пятом.

После проведения описанной выше процедуры по определению оптимального положения поляризующихся слоев было установлено, что наибольшее снижение невязки происходит при введении частотной зависимости сопротивлений слоев 2, 4, 6 и 7. Для дальнейшего снижения количества параметров было предложено заменить слои 6 и 7 на один слой, толщина которого равна сумме толщин исходных. График невязки для данной модели приведен на рис. 6.

Значения невязки не превосходят 10, что можно считать показателем удовлетворительного качества моделирования.

На рис. 7 приведены результаты инверсии. Съёмки проводились в Сибири при наличии вечной мерзлоты. В данном случае принято считать, что основным источником поляризуемости является зона протайки.

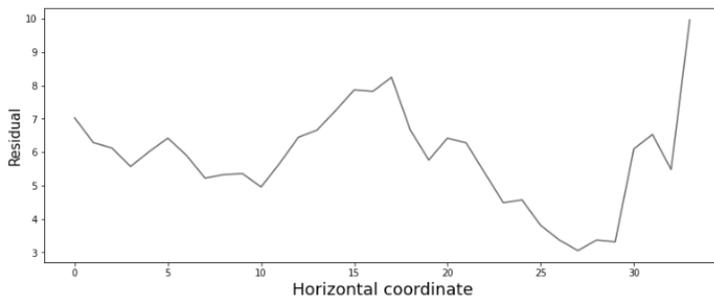


Рис. 6. Значения невязки для модели с поляризуемостью в слоях 2 и 5

Видно, что при использовании поляризующейся модели удалось идентифицировать непрерывные горизонтальные слои, что соответствует представлениям геологов о структуре разреза в данном регионе. Кроме того, даже для участка данных с положительной синфазной компонентой отклика модель с поляризацией позволяет получить более физически адекватное решение: нижний проводящий слой присутствует на всем протяжении съемочной траектории.

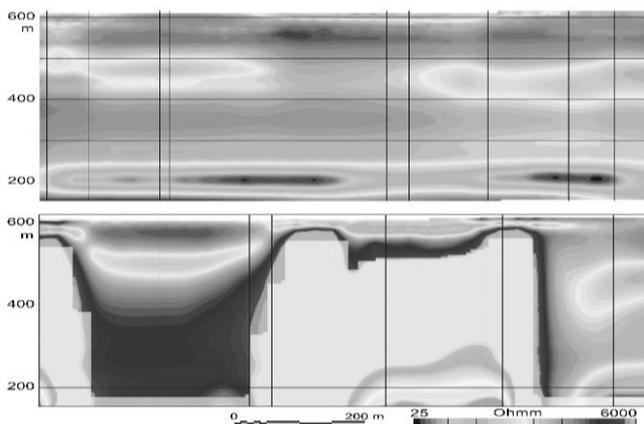


Рис. 7. Результаты инверсии

4. Выводы

В данной работе был предложен подход к инверсии данных аэроэлектроразведки в присутствии эффекта ВП. Были проведены численные исследования используемых моделей и выявлены значения их характеристик, необходимые для описания данных, содержащих ВП. Кроме того, было показано, что в некоторых ситуациях для точного моделирования необходима информация о расположении поляризующихся слоев в среде. Рассмотрение моделей с поляризуемостью, сосредоточенной в одном из слоев, позволило сделать вывод о локальности источников ВП. Было показано, что при введении частотно-зависимых сопротивлений малого количества слоев можно получить физически адекватные результаты инверсии в тех случаях, когда стандартные методы приводят к неправильным результатам.

Литература

1. BAI P., VIGNOLI G., HANSEN T. *1D stochastic inversion of airborne time-domain electromagnetic data with realistic prior and accounting for the forward modeling error* // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13, No. 19. – P. 38–81.
2. COLE K.S., COLE R.H. *Dispersion and absorption in dielectric I* // The Journal of Chemical Physics. – 1941. – Vol. 4, No. 9. – P. 341–351.
3. DIAS C. *Developments in a model to describe low-frequency electrical polarization of rocks* // Geophysics. – 2000. – Vol. 2, No. 65. – P. 437–451.
4. GURIN G., TITOV K., ILYIN Y. *Induced polarization of rocks containing metallic particles: evidence of passivation effect* // Geophysical Research Letters. – 2019. – Vol. 2, No. 46. – P. 670–677.
5. HEAGY L., OLDENBURG D. *Electrical and electromagnetic methods for well integrity* // AGU Fall Meeting Abstracts. – 2021. – Vol. 1, No. 1. – P. 12–15.
6. KAMINSKI V., VIEZZOLI A. *Modeling induced polarization effects in helicopter time-domain electromagnetic data: Field case studies* // Geophysics. – 2017. – Vol. 2, No. 82. – P. 49–61.

7. KARSHAKOV E., MOILANEN J. *Overcoming Airborne IP in Frequency Domain: Hopes and Disappointments* // Proc. of SAGA Biennial Conf. & Exhibition. – 2019. – Vol. 1, No. 1. – P. 1–4.
8. KARSHAKOV E. *Iterated extended Kalman filter for airborne electromagnetic data inversion* // Exploration Geophysics - 2020. – Vol. 1, No. 51. – P. 66–73.
9. KARSHAKOV E. *Airborne electromagnetics: dealing with the aircraft speed* // Proc. of the 8th Int. Airborne Electromagnetics Workshop. – 2023. – Vol. 1, No. 1. – P. 1–4.
10. KLOSE T., GUILLEMOTEAU J., VIGNOLI G. et al. *Laterally constrained inversion (LCI) of multi-configuration EMI data with tunable sharpness.* // Journal of Applied Geophysics. – 2022. – No. 196. – P. 104–519.
11. MACNAE J., HINE K. *Comparing induced polarisation responses from airborne inductive and galvanic ground systems: Tasmania* // Geophysics. – 2016. – Vol. 81, No. 6. – P. E471–E479.
12. MACNAE J. *Geological interpretation of near-surface induced polarization and superparametric effects in airborne electromagnetic data* // Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. – 2021. – Vol. 1, No. 1. – P. 118–128.
13. MADSEN L., FIANDACA G., AUKEN E. *3D-time-domain spectral inversion of resistivity and full-decay induced polarization data – full solution of Poisson’s equation and modelling of the current waveform* // Geophysics. – 2020. – Vol. 223, No. 3. – P. 2101–2116.
14. MOILANEN J., KARSHAKOV E., VOLKOVITSKY A. *Time-domain helicopter EM System “Equator”: resolution, sensitivity, universality* // Proc. of SAGA Biennial Conf. & Exhibition. – 2013. – Vol. 1, No. 1. – P. 1–4.
15. MOILANEN J. *Modern methods of airborne electromagnetic survey* // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2022. – Vol. 58, No. 5. – P. 755–764.
16. OLDENBURG D., KANG S., HEAGY L. et al. *Direct current resistivity methods* // Engineering Geophysics. – 2022. – Vol. 55, No. 4. – P. 67–75.

17. PELTON W., WARD S., HALLOF G. et al. *Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP* // *Geophysics*. – 1978. – Vol. 3, No. 43. – P. 588–609.
18. WEIS J., HEAGDY L., OLDENBURG D. *Comparison of magnetic vector inversion with sparse norm susceptibility inversion accounting for demagnetization* // *SEG*. – 2023. – Vol. 1, No. 1. – P. 37–65.
19. XUE G. et al. *Geophysics for critical minerals – Introduction* // *Geophysics*. – 2024. – Vol. 89, No. 1. – P. 98–116.
20. ZHDANOV M. *Geophysical electromagnetic theory and methods*. – Elsevier, 2009.

MODELLING INDUCED POLARIZATION EFFECT IN FREQUENCY DOMAIN AEM DATA

Dmitrii Khliustov, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, PhD student (hlustov.d@gmail.com).

Abstract: Airborne electromagnetics is one of the most widespread methods of geophysical survey. In the process of exploration airplane obtains data on electromagnetic response of the medium to the signal of controlled electromagnetic source. Often it is possible to create a simple model of the medium, having real-valued apparent resistivities. However, sometimes data are significantly impacted by the induced polarization effect. It manifests itself in dependence of apparent resistivity on signal frequency. The classical approach to modelling IP consists in using a frequency dependent resistivity model for each layer of the medium. However, the number of parameters in this approach increases rapidly with resolution, hence the inversion problem becomes incorrect. The lack of unique solution of inverse problem leads to the final result of data interpretation being dependent on starting model and prior information. In this work authors suggest an approach to solving this problem, which is applied for inversion of real data. It is shown that sometimes the starting model may be chosen based on analysis of responses obtained for a part of data close to the one containing IP.

Keywords: airborne electromagnetics, Kalman filter, induced polarization.

УДК 550.83, 681.51

ББК 22.172

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Б.В. Павловым.*

Поступила в редакцию 31.10.2024.

Опубликована 31.03.2025.