

Е. В. Агеенков¹✉

Некоторые аспекты переходного процесса после импульсного воздействия заземлённой электрической линии на проводящую поляризующуюся среду

¹Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука
Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГТ СО РАН),
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: ageenkovev@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Объектом исследования является электромагнитный (ЭМ) переходный процесс (ПП), возникающий в проводящей поляризующейся геологической среде после воздействия на неё низкочастотными разнополярными прямоугольными импульсами, пропускаемыми через заземлённую электрическую линию (ЗЭЛ). Сделан обзор опубликованных исследований, касающихся импульсного режима работы источника ЗЭЛ. Выполнено численное моделирование неустойчивого ЭМ поля для проводящей поляризующейся модели геологической среды в электрической установке.

Ключевые слова: переходный процесс, заземлённая электрическая линия, электрическая установка.

E. V. Ageenkov¹✉

Features of the transient process after the pulse impact of a grounded electric line on a conductive polarizing medium

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics
of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS),
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: ageenkovev@ipgg.sbras.ru

Abstract. The object of the study is the electromagnetic (EM) transient process arising in a conductive polarizable geological environment after exposure to low-frequency bipolar rectangular pulses passed through a grounded electric line (GEL). A review of published studies concerning the source of GEL is made. Numerical modeling of the unsteady EM field for a conductive polarizable model of a geological environment in a electrical installation is performed.

Keywords: transient process, grounded electric line, electrical installation

Введение

ЗЭЛ является одним из искусственных источников ЭМ поля, применяющихся в электроразведке для изучения внутреннего строения земли [1]. В геологической среде под воздействием потенциального электрического поля гальванических контактов (заземлений) возникает гальванический ток, втекающий и вытекающий через заземления. Появление и исчезновение электрического поля в геологической среде, при включении и выключении источника, индуцирует вторичное вихревое электрическое поле, вызывающее вихревой ток. При воздей-

ствии электрического поля (потенциального или вихревого) на полифазную гетерогенную геологическую среду в ней происходят процессы разделения зарядов различной природы – зарядка среды [2, 3, 4]. Возвращение среды в состояние равновесия после исчезновения электрического поля сопровождается эффектами вызванной поляризации (ВП) [3, 4, 5, 6], феноменологически проявляющиеся как ЭМ сигнал [7]. Таким образом, при включении источника в проводящей поляризующейся геологической среде возникает ток проводимости, происходит её зарядка и наблюдается диффузия вихревого электрического поля вширь и вглубь среды от источника (становление ЭМ поля (СП)), сопровождающаяся вихревым током. При выключении источника происходит релаксация (деполяризация) среды, сопровождающаяся ЭМ сигналом ВП, и наблюдается диффузия вихревого электрического поля обратной полярности по сравнению со случаем включения источника.

Для источника ЗЭЛ выделяется осевая и экваториальная области источника, различающиеся направлением электрического поля, а вследствие этого направлением гальванического тока (Рис. 1а) [8]. Направление поля сравнивается с его направлением внутри заземлений источника. Совпадающее направление поля считается положительным, обратное – отрицательным. От него зависит полярность разности потенциалов во время пропускания тока и переходного процесса (Рис. 1б).

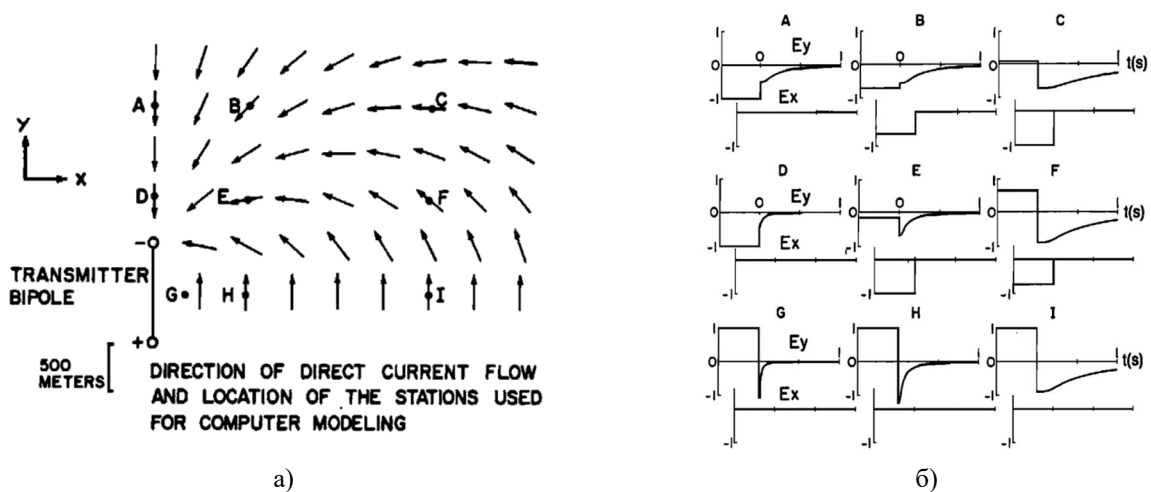


Рис. 1. Направление течения тока проводимости на поверхности неполяризующегося полупространства земли (а). Напряжённость электрического поля во время течения тока проводимости и во время становления (б). Знак сигнала во время пропускания тока в осевой (точки А, В, С) и экваториальной (G, H, I) области различен [8].

Таким образом, во время ПП в измерителях регистрируется ЭМ сигнал, связанный, по меньшей мере, со становлением ЭМ поля и с ВП. Установлено, что

на поверхности Земли для осевой и экваториальной областей источника вид ПП будет различаться из-за разного знака его составляющих (СП и ВП) [9].

В публикации [9] средствами математического моделирования показано, что для гальванической установки существуют такие положения приемной линии, при которых эффект ВП существенно ослаблен. Рассмотрена модель полупространства с удельным сопротивлением $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, параметры поляризации: $\eta = 0.05$ д.ед., $\tau = 0.01$ с, $c = 0.5$ б.р.. Моделировались зондирования экваториальной гальванической установкой: питающая линия $AB = 100$ м, измерительная линия $MN = 50$ м, разнос (расстояние между центрами линий) $r = 50$ м.

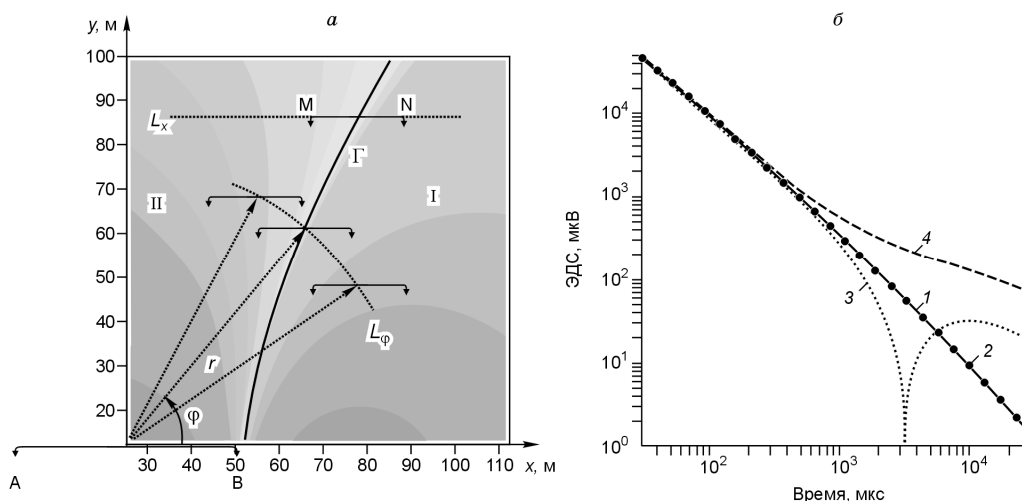


Рис. 2. Поведение откликов поляризующейся среды при гальваническом возбуждении и регистрации: а – области положительного (I) и знакопеременного (II) поведения сигналов (Γ – граница областей) для модели поляризующегося полупространства; б – зондирования в точке на границе: 1 – без ВП, 2, 3, 4 – ВП зондирования для азимутальных отклонений относительно положения на границе Γ : 3 – $(+0.5^\circ)$, 4 – (-0.5°) [9].

На рис. 2а представлена карта пространственного распределения значений сигнала на фиксированной временной задержке. При расположении приёмной линии на границе Γ графики ЭДС, рассчитанные для неполяризующейся и поляризующейся сред, совпадают (кривые 1 и 2, см. рис. 2б). Сигналы по разные стороны границы Γ имеют качественные различия (графики 3 и 4 получены при отклонении от линии Γ по азимуту на 0.5° , см. рис. 2б).

В итоге расчёты показали для модели поляризующегося полупространства в осевой области сигнал ВП проявляется в ПП в виде замедления его скорости, сигналы СП и ВП – одинаковой полярности. В экваториальной области сигнал ВП проявляется как ускорение ПП вплоть до смены полярности, это означает, что сигналы СП и ВП разной полярности. Когда в ПП по амплитуде преобладает сигнал СП, наблюдается одна полярность сигнала, затем сигнал СП затухает и преобладающим по амплитуде становится сигнал ВП противоположной полярности, а в ПП наблюдается смена знака сигнала.

Для слоистой модели даже в осевой установке, расположенной на поверхности Земли, получен схожий знакопеременный вид ПП [10, 11]. Для геоэлектрической модели акваторий, при помещении осевой установки внутрь водного слоя, была отмечена зависимость вида ПП от высоты установки над дном [12, 13, 14]. В случае 2-х слойной среды с неполяризующимся водным слоем и поляризующимся основанием, от высоты установки над дном зависит расстояние между установкой и поляризующейся средой [12, 13]. В случае аномально поляризующегося слоя помещённого внутрь геологической среды, покрытой водной толщей, от высоты установки над дном и глубины погружения кровли аномального слоя зависит расстояние между установкой и кровлей этого слоя [14]. Высказывалось предположение, что смена знака ПП в осевой установке связано с проявлением индукционно вызванной поляризации [10, 11, 12, 13]. Однако, в ряде публикаций такое проявление сигнала ВП связывалась не с вихревым, а с гальваническим током [15, 16, 17].

Приведённые ниже расчёты предполагают внести ясность в вопрос с каким воздействием связан сигнал ВП: индукционным или гальваническим.

Методы и материалы

Геоэлектрические модели заимствованы в публикациях [10, 11] и представлены неполяризующейся толщей с УЭС 50 Ом·м мощностью 300, высокоомным неполяризующимся слоем с УЭС 1 кОм·м и 1 МОм·м мощностью 500 м и аномально поляризующаяся толща с УЭС 50 Ом·м мощностью 1000 м (Табл. 1).

Таблица 1

Геоэлектрические модели

Слой	ρ , Ом·м	η , %	τ , с	C, б.р.	h, м
1	50	0			300
2	1e+3; 1e+6	0			500
3	50	50	1	0,5	1000
4	50	0			∞

УЭС высокоомного слоя увеличено до 1 МОм·м для значительного снижения гальванического воздействия на сильно поляризующийся слой, расположенный ниже него.

Расчёты переходного процесса проводились методом линейной фильтрации решения задачи ЭМ становления [18]. Первоначально вычислялась частотная характеристика сигнала в широком диапазоне частот, затем путём преобразования Фурье получалось решение во временной области. Учёт эффекта ВП осуществлён введением частотно зависимо УЭС формулой Коула-Коула [8] (1):

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

где ρ_0 – УЭС на постоянном токе (Ом·м); η – коэффициент поляризуемости (доли ед.); τ – постоянная времени (с); c – показатель степени; ω – круговая частота (с⁻¹).

Расчёт ПП выполнялся для времени с 1 мс до 2 с, учитывалось пропускание четырёх разнополярных импульсов. Для оценки вклада сигнала ВП выполнялся расчёт сигнала СП для неполяризующейся модели и его вычитание из ПП, предполагая аддитивность сигналов СП и ВП в ПП [19].

Результаты

Для осевой установки с АВ – 500 м, MN – 1000 м, разнос – 1250 м, полученные ПП, сигналы СП и ВП представлены на графиках (Рис. 3) в абсолютных значениях. Положительные значения показаны тёплыми тонами, отрицательные – холодными.

Для модели с УЭС 1 кОм·м на поздних временах отмечается смена знака сигнала. Сигнал ВП для этой модели на коротком интервале времени представлен положительными значениями (ВП 1к), затем знак сигнала меняется, а на времени около 300 мс он становится больше по амплитуде, чем сигнал СП, что выражается в смене знака ПП.

Для модели с УЭС 1 МОм·м ПП на всём расчётном интервале времени сохраняет положительные значения. Как показывают расчёты он не определяется только сигналом СП, т.к. разность значений ПП и СП достигает значений $1e-4$ В/А, однако на поздних временах разность быстро уменьшается и ПП определяется только сигналом СП.

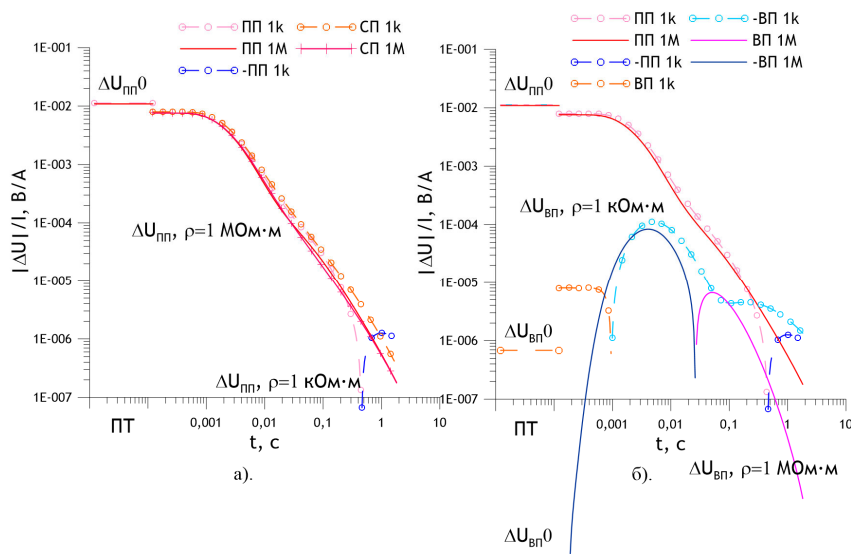


Рис. 3. ПП, СП и ВП от моделей с УЭС высокоомного слоя 1 кОм·м и 1 МОм·м.

Обсуждение

Показанное в предыдущих исследованиях присутствие смены знака ПП в экваториальной области электрического источника для поляризующегося полупространства отмечается и в осевой области для слоистой поляризующейся модели. Сделанное ранее предположение о связи смены знака ПП с проявлением индукционно вызванной поляризации подвержено сомнению, большее влияние на поляризующийся слой, рассмотренной модели, связано с гальваническим током. В моделях сильно поляризующийся слой находится под высокоомным

слоем значительной мощности, сигнал ВП связан только с воздействием источника на этот слой. Заземлённая электрическая линия воздействует на геологическую среду и гальваническим током и индуктивно, создавая в ней вихревой ток. Предполагалось, что ВП связано с воздействием гальванического и вихревого тока. Проявление в измерителях, расположенных в осевой области источника, сигнала ВП, связанного с гальваническим током, предполагалось как замедление скорости спада ПП. А проявление сигнала ВП, связанного с вихревым током, – как ускорение спада ПП, вплоть до смены знака ПП.

При повышении УЭС высокоомного слоя до 1 МОм·м предполагалось только индукционное возбуждение ВП по экраном.

Сравнивая графики ВП (см. рис. 3б) для двух моделей можно отметить их схожесть на временах от 1 мс до 10 мс, здесь наблюдается «импульс» сигнала отрицательного знака. Затем сигнал ВП от модели с УЭС 1 МОм·м меняет знак, затухает и не проявляется в ПП. От модели с УЭС 1 кОм·м сигнал ВП сохраняет отрицательную полярность, но после времени порядка 100 мс замедляется скорость его спада, затем его амплитуда становится преобладающей в ПП, который наследует скорость спада и знак сигнала ВП.

Заключение

Можно предположить, что в графиках сигнала ВП показано проявление индукционно вызванной поляризации в виде «всплеска» сигнала ВП. Для модели с УЭС 1 кОм·м сигнал ВП имеет сложную форму, вероятно, это связано с проявлением гальванически вызванной поляризации на ранних и поздних временах. Остаётся неясным механизм смены знака сигнала ВП в осевой области электрической линии, предположительно возникшего после воздействия гальванического тока.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований (ФНИ) №FWZZ-2022-0024.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Могилатов В.С. Импульсная электроразведка. – Новосибирск : НГУ, 2014. – 300 с.
2. Шейнманн М.С. Современные физические основы теории электроразведки – М. : Недра, 1969. – 224 с.
3. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. – Л. : Недра, 1980. – 391 с.
4. Титов К.В. Электрокинетические явления в горных породах и их применение в геоэлектрике. Дис. докт. геол.-минер. наук. – СПб. : СПбГУ, 2003.
5. Каменецкий Ф.М., Тригубович Г.М., Чернышёв А.В. Три лекции о вызванной поляризации геологической среды. – Мюнхен: Вела Ферлаг, 2014. – 58 с.
6. Халлбауэр-Задорожная, В.Ю. Процессы, происходящие в горных породах при наложении электрического тока и разности потенциалов: вызванная поляризация // Вопросы естествознания. – 2016. – №3(11). – С. 76–79.

7. Крылов С.С. Геоэлектрика: Поля искусственных источников. – СПб. : С.-Петербургский университет, 2004. – 138 с.
8. West G.F., Macnae J.C. Electromagnetic physics of the electromagnetic induction exploration method // *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics–Applications. SEG Investigations in Geophysics*. 2008. V. 2. P. 5–46.
9. Антонов Е.Ю., Шеин А.Н. Способы повышения качества инверсии данных нестационарных электромагнитных зондирований // *Геология и геофизика*. – 2008. – № 10. – С. 1046–1062.
10. Легейдо П.Ю. Теория и технология дифференциально-нормированной геоэлектро-разведки для изучения поляризующихся разрезов в нефтегазовой геофизике. Дис. на соиск. уч. ст. д. г.-м. н. – Иркутск : ИрГТУ, 1998. – 198 с.
11. Агеенков Е.В., Ситников А.А., Пестрев И.Ю., Попков А.В. О проявлении процессов индукционного становления и вызванной поляризации при работе с осевой и симметричной электрическими установками // *Геология и геофизика*. 2020. Т. 61. № 7. С. 976–991. <https://doi.org/10.15372/GiG2019151>.
12. Агеенков Е.В., Ситников А.А., Воднева Е.Н. Результаты математического моделирования переходных процессов для условий акваторий морского шельфа // *Геология и геофизика*. 2022. Т. 63. № 7. С. 971–987.
13. Агеенков Е.В., Ситников А.А., Владимиров В.В., Пестерев И.Ю. Переходный процесс на акваториях морского шельфа при работе с осевой и экваториальной электрическими установками и полевой эксперимент // *Физика Земли*, 2023, № 2, с. 224–240. DOI: 10.31857/S0002333723020011, EDN: LGSTNS
14. Агеенков Е.В., Иванов С.А. Анализ проявления субаквальной зоны воздействия углеводородов в электромагнитном переходном процессе // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2024. № 3. С. 68–78. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/3/68-78>
15. Моисеев В.С. Метод вызванной поляризации при поисках нефтеперспективных площадей. – Новосибирск : Наука, 2002. – 136 с.
16. Агеев В.В., Каринский С.Д., Светов Б.С. Становление электромагнитного поля в поляризующейся среде и определение параметров Cole-Cole // *Геофизика*. 2006. № 5. С. 40–45.
17. Агеев В.В. К вопросу о природе отрицательных значений вызванной поляризации в переходном процессе при работах с осевой электрической установкой на морском шельфе // *Физика Земли*. 2023. № 2. С. 241–250.
18. Петров А.А. Возможности метода становления электрического поля при поисках углеводородов в шельфовых зонах // *Геофизика*. – 2000. – №5. – с. 21–26.
19. Патент RU 2 399 931 C2. Способ количественного разделения эффектов электромагнитной индукции и вызванной поляризации. Легейдо П.Ю., Иванов С.А., Агеенков Е.В. и др. 2010.09.20.

© Е. В. Агеенков, 2025