

УДК 550.8.05

К ВОПРОСУ О ПРИРОДЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ПЕРЕХОДНОМ ПРОЦЕССЕ ПРИ РАБОТАХ С ОСЕВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ НА МОРСКОМ ШЕЛЬФЕ

© 2023 г. В. В. Агеев*

Центр геоэлектромагнитных исследований, филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
г. Троицк, Россия

*E-mail: ageevvv@yandex.ru

Поступила в редакцию 31.07.2022 г.

После доработки 24.10.2022 г.

Принята к публикации 31.10.2022 г.

В статье описаны представления об источниках полей вызванной поляризации, порождаемых сторонними силами неэлектрического происхождения. Рассмотрены слоистые поляризующиеся среды, над которыми для осевой электрической установки может наблюдаться смена знака вызванной поляризации. Численными модельными экспериментами обосновывается вывод о том, что вызванная поляризация в этом случае вызывается гальваническими токами и не связана с индукционной составляющей.

Ключевые слова: вызванная поляризация, частотная дисперсия, сторонние токи, переходный процесс, осевая электрическая установка.

DOI: 10.31857/S000233723020023, **EDN:** LGYWWP

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая публикация простимулирована дискуссией с авторами статьи “Переходный процесс на акваториях морского шельфа при работе с осевой и экваториальной электрическими установками и полевой эксперимент” (Агеев Е.В., Ситников А.А., Владимиров В.В., Пестерев И.Ю). В ней, помимо актуальной задачи показать, от чего зависит вид наблюдаемых на практике при морских работах сложных, разнообразных переходных процессов над поляризующимся под водой разрезом, еще анализируются вклады разных по способу возбуждения полей вызванной поляризации (ВП) в суммарный сигнал — гальванически вызванной поляризации (ВПП) и индукционно вызванной поляризации (ВПИ). Авторами утверждается, что индукционно вызванная поляризация в осевой области горизонтальной электрической линии проявляется в смене знака $\Delta U(t)$ на больших временах. И это является визуальным признаком ВПИ. Утверждается, что при морских работах мы имеем дело с особой средой, которую создают сильно проводящая вода и проводящее поляризующееся основание и которая позволяет в переходном процессе проявляться сигналу ВПИ.

Можно предложить альтернативный анализ такого вида переходных процессов, включая мор-

ские условия. При решении прямых задач мы получаем сумму вкладов ВПП и ВПИ в переходную характеристику. В данной работе, используя разную зависимость этих составляющих ВП от разных параметров разреза и осевой установки, мы постарались численными модельными экспериментами показать, что отрицательные значения ВП имеют гальваническую природу и это согласуется с нашими представлениями об источниках поля ВП.

Поляризуемость среды в наших рассуждениях мы представляем следующим образом [Светов и др., 2011; Каринский, 2011; Агеев и др., 2006; Кормильцев, 1981]. В дисперсионной модели влияние поляризуемости среды может быть описано двумя способами. Во-первых, мы можем считать, что проводимость среды есть функция частоты. Например, использовать феноменологическую формулу Cole-Cole для описания частотной дисперсии проводимости. Во-вторых, ту же самую модель можно описать следующим образом. Проводимость среды от частоты не зависит, но в среде появляется зависящая от частоты сторонняя ЭДС и соответствующий ей сторонний ток $j^{\text{СТ}}$. Введенная сторонняя ЭДС описывает осредненные силы неэлектрического происхождения, действующие на электрически заряженные частицы. Такое представление точнее отражает физический смысл процессов в среде и

позволяет в некоторых простых задачах, рассмотренных в статье, представить распределение источников поля ВП и, в частности, объяснить смену знака ВП.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЛЯРИЗУЮЩЕЙСЯ СРЕДЕ

Для понимания нашей позиции по обсуждаемому вопросу определим некоторые понятия. Сначала рассмотрим случай, когда можно пренебречь электромагнитной индукцией. Физический смысл явления вызванной поляризации заключается в том, что под действием первичного электрического поля помимо первичного электрического тока, связанного с перемещением зарядов под действием кулоновских сил самого поля, в среде протекают сторонние электрическому полю процессы — электрокинетические, электрохимические и другие. В этих случаях энергия электрического поля частично переходит в энергию другого поля, происходит перераспределение зарядов на микроуровне в объеме пород, среда поляризуется, возникают сторонние ЭДС. Релаксация избыточных зарядов в отдельных ячейках, усредненная по объему среды, феноменологически воспринимается как появление стороннего тока противоположного направления, вызванного нарушением равновесия концентрации зарядов. Но это еще не токи ВП. Аналогичная ситуация имеет место в методе естественного электрического поля (ЕП) при изучении электрокинетических фильтрационных потенциалов. Там в пористой среде под действием сторонней силы — градиента давления двигаются заряды диффузной части двойного электрического слоя вместе с жидкостью. Этот поток представляет собой электрический ток. Это сторонний ток не ЭМ природы. Но просто течения жидкости через пористую среду недостаточно для того, чтобы появилось электрическое поле фильтрации. Электрическое поле создается макрочарядами, а не током. Должны где-то возникнуть макрочаряды — источники электрического поля ЕП. Как показано в работе [Кауфман и др., 2013], такими местами являются неоднородности по электрическим и фильтрационным параметрам, которые пересекает сторонний ток течения, и места нагнетания и разгрузки воды. К аналогичному выводу приходит Титов К.В. [Титов, 2003], подробно описывая три типа возможных макроисточников электрического поля ЕП. Источники первого типа — гидродинамические (первичные — расположены в местах, где поверхностные воды входят в пористую среду или выходят из нее, вторичные — в местах неоднородности среды по коэффициенту фильтрации и источники, связанные с нестационарным течением). Источники второго типа возникают на границах неоднородности среды по электрокинетическо-

му коэффициенту тока, а третьего типа — по электропроводности.

Заметим, что при строгой математической формулировке рассматриваемых задач, в которых возникают сторонние силы, нам достаточно определить распределение соответствующих сторонних токов в среде и для этого распределения решать обычную электродинамическую задачу по определению ЭМ полей. Однако приведенные рассуждения о локализации реальных источников — макрочарядов полезны для лучшего понимания и объяснения возникающих эффектов.

Вернемся к задаче ВП. На макроуровне мы можем обойтись без элементарных зарядов, рассматривая только токи, напряженности и поверхностные заряды на границах неоднородностей. Самая простая задача однородной поляризуемой среды, возбуждаемой постоянным током в линии АВ с шаровыми электродами заземления, рассмотрена в работе [Кормильцев, 1981]. Показано, что при зарядке стабилизированным током на поверхности шарового заземления возникает плотность зарядов, которая описывается двумя составляющими. Первая составляющая — это основные заряды, которые появляются практически мгновенно при включении тока в линии АВ и создают первичное поле E_0 . Убыль основных зарядов восполняется каждое мгновение током, подводимым к заземлению. Вторая составляющая — это дополнительные заряды, которые накапливаются на заземлениях АВ по мере возникновения сторонних сил в поляризуемой среде и поддерживаются сторонним током. Именно эти дополнительные заряды являются источником электрического поля ВП и токов ВП в данной задаче. Ток ВП совпадает по направлению с первичным полем E_0 и первичным током. После включения тока зарядки основные заряды на заземлении исчезают, а дополнительные заряды продолжают восполняться сторонним током в поляризованной среде и создавать электрическое поле ВП, постепенно спадая. То есть для однородного поляризуемого пространства или полупространства электрический макрочаряд, создающий поле ВП, образуется на поверхности заземлений АВ, но поддерживается сторонними токами во всем объеме поляризованной среды. Это можно продемонстрировать следующим натурным экспериментом, выполненным в окрестностях г. Уренгоя. Результат показан на рис. 1. Использовалась трехэлектродная установка АМН. Электрод В отнесен в бесконечность перпендикулярно MN, чтобы ослабить индукционные эффекты. Электроды MN неполяризуемые. Разнон небольшой, 10 м. Генераторная линия АВ запитывалась от аккумуляторов. В момент включения вручную переключателем отключался аккумулятор, а линия АВ закорачивалась. Анало-

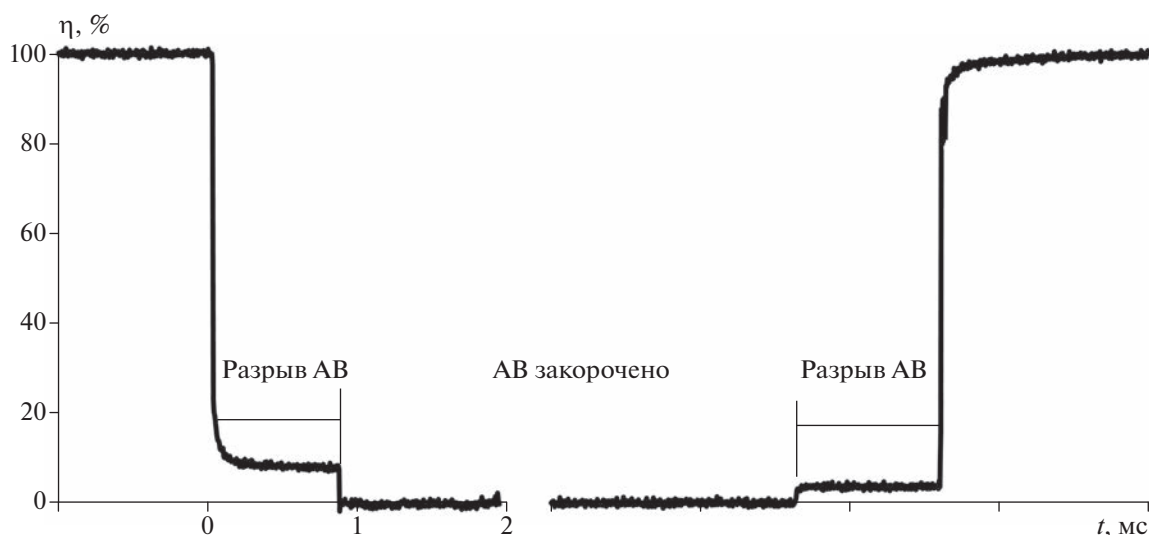


Рис. 1. Результат регистрации поля на приемных электродах MN при выключении и включении тока от аккумулятора в генераторной линии при закороченной линии АВ и с ее разрывами.

гично при включении разрывалась линия АВ и подключался аккумулятор. Время срабатывания переключателя оказалось примерно 1 мс. При выключении таким способом мы отсоединяем аккумулятор, но линия АВ в течение 1 мс еще разомкнута. В этот момент на электродах АВ сторонними токами в поляризованной среде поддерживается дополнительный заряд, который создает поле ВП на приемнике MN. Поэтому на рисунке в течение первой 1 мс мы наблюдаем типичный спад ВП. Спустя примерно 1 мс замыкается линия АВ, поэтому практически мгновенно исчезает заряд на электродах АВ и, как видно на рисунке, исчезает поле ВП на приемной линии MN. Примерно через 1 с переключателем разрываем линию АВ. В этом состоянии она находится 1 мс. В поляризованной среде релаксация сторонних токов еще не успела закончиться, и они сразу формируют дополнительный заряд на разомкнутых электродах АВ. На MN опять регистрируется остаточное поле ВП. Уже после этого подключается аккумулятор и на рис. 1 наблюдается фронт включения.

Таким образом мы можем убирать влияние однородной вмещающей поляризуемой среды, используя генератор напряжения (генератор с очень малым выходным сопротивлением) и в момент пропускания тока и в паузе. Часто коммутируют аккумуляторы с малым внутренним сопротивлением, но в паузе линию АВ разрывают. Тогда в паузе имеем дело уже с генератором тока. Такой прием с использованием генератора напряжения позволит ослабить фон от вмещающей среды и выделять локальные поляризуемые объекты. Этот прием, но только для момента про-

пускания тока, описан в работе [Шестернев и др., 2003].

Следующая задача с локальным поляризуемым телом в проводящем полупространстве рассмотрена в ряде работ [Светов и др., 2011; Кормильцев, 1981; Соловейчик и др., 2011]. С введением понятия сторонних сил и стороннего тока можно дать следующее физическое описание происходящих процессов. Пусть поле возбуждается электрической линией АВ. При протекании поляризующего тока j_0 в объемно поляризуемом теле возникают сторонние ЭДС и сторонний ток, направленный в противоположную сторону. Сторонний ток не может выйти за пределы поляризуемого тела, и, следовательно, его нормальная компонента j_n^{CT} создает на его границе неоднородно распределенные поверхностные заряды разного знака в соответствии с законом сохранения заряда. Изменяющиеся во времени поверхностные заряды порождают вне и внутри тела токи вызванной поляризации. Это обычные токи проводимости, сопровождаемые электрическим полем $E^{ВП} : j_{1,2}^{ВП} = \sigma_{1,2} E^{ВП}$. Схематически направление всех токов представлено на рис. 2 из нашей статьи [Светов и др., 2011]

От соотношения проводимостей вмещающей среды и поляризуемого тела будет зависеть соотношение величины внешнего тока ВП и тока ВП внутри тела. В работе [Кормильцев, 1981] особо отмечается экстремальный характер поведения поляризуемости над поляризующимся шаром в зависимости от его проводимости. При малой проводимости первичный ток не затекает в шар и не поляризует его. При большой проводимости первичный ток внутри шара максимален и

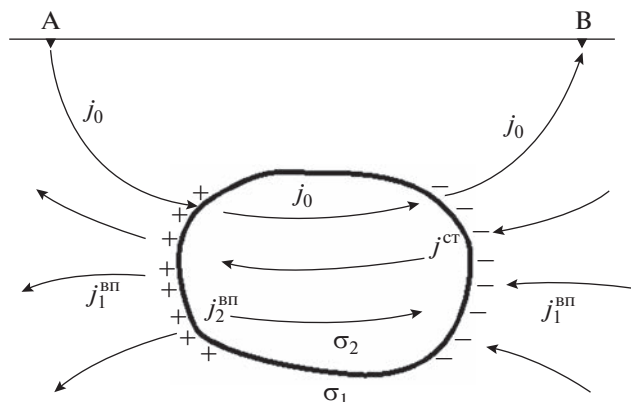


Рис. 2. Схема направлений протекания первичного, стороннего тока и токов ВП в локальном объемно поляризуемом теле и в неполяризуемой вмещающей среде с образованием поверхностных зарядов.

вещество шара, несомненно, поляризуется. Но при этом внешние токи ВП будут существенно меньше внутренних, и на поверхности земли даже сильно поляризующееся тело слабо проявится. Пример расчета для симметричной установки AMNB над 2D- поляризующейся вставкой представлен на рис. 3.

Следует обратить внимание на то, что мы анализируем случай с объемной поляризацией, при

которой на границе тела возникает простой заряженный слой. Но для электропроводящего поляризующегося тела в растворе электролита будет иметь место двойной слой на границе тела с предельно сближенными разноименными зарядами и сторонние силы сосредоточены вблизи поверхности раздела фаз. Поэтому, например, при лабораторных экспериментах с металлическим телом в баке с электролитом над телом будет интенсивная аномалия ВП, несмотря на его огромную проводимость. Здесь нет противоречия с выше сказанным, так как это другой случай с двойным слоем, который мы не рассматриваем.

МОДЕЛИ СЛОИСТЫХ СРЕД, ПРИВОДЯЩИЕ К СМЕНЕ ЗНАКА ВП

Третья задача касается слоистых поляризующихся сред. В нашей статье [Агеев и др., 2006] рассмотрена цилиндрически слоистая среда. Скважина радиусом 0.1 м заполнена неполяризующейся водой, среда за стенкой скважины поляризуется. Возбуждение поля осуществляется соосным со скважиной электрическим диполем, ток в котором выключается по закону ступени. Измерение электрического поля выполняется на оси скважины. УЭС воды и среды одинаковые. Повторим рассуждения, как и в предыдущей задаче с локальным поляризующимся телом. При пропускании тока среда за стенкой скважины по-

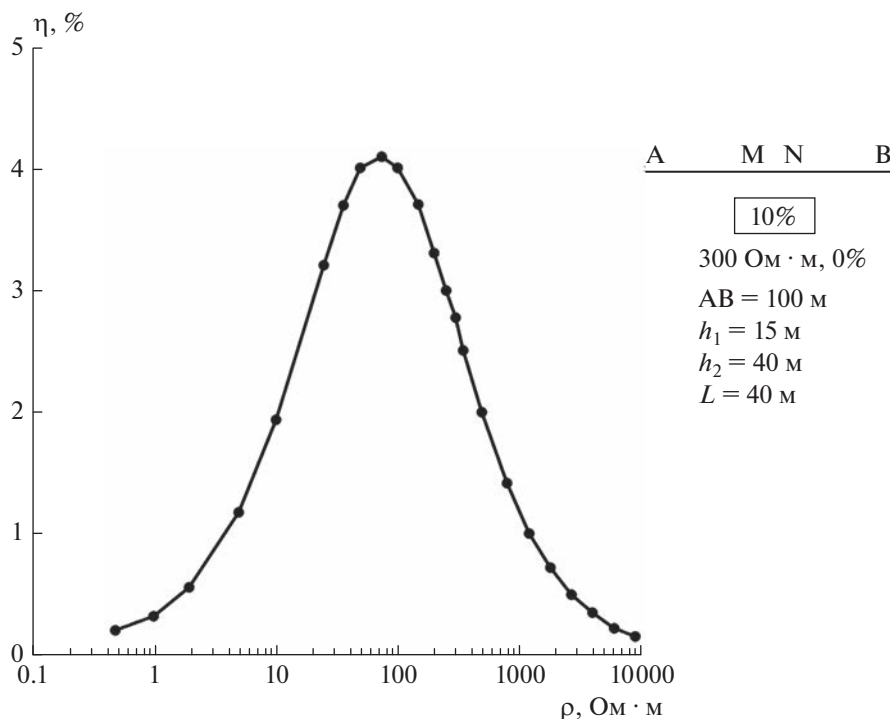


Рис. 3. Значения ВП для симметричной установки AMNB над 2D-прямоугольной поляризующейся вставкой в зависимости от ее УЭС. УЭС среды 300 Ом·м.

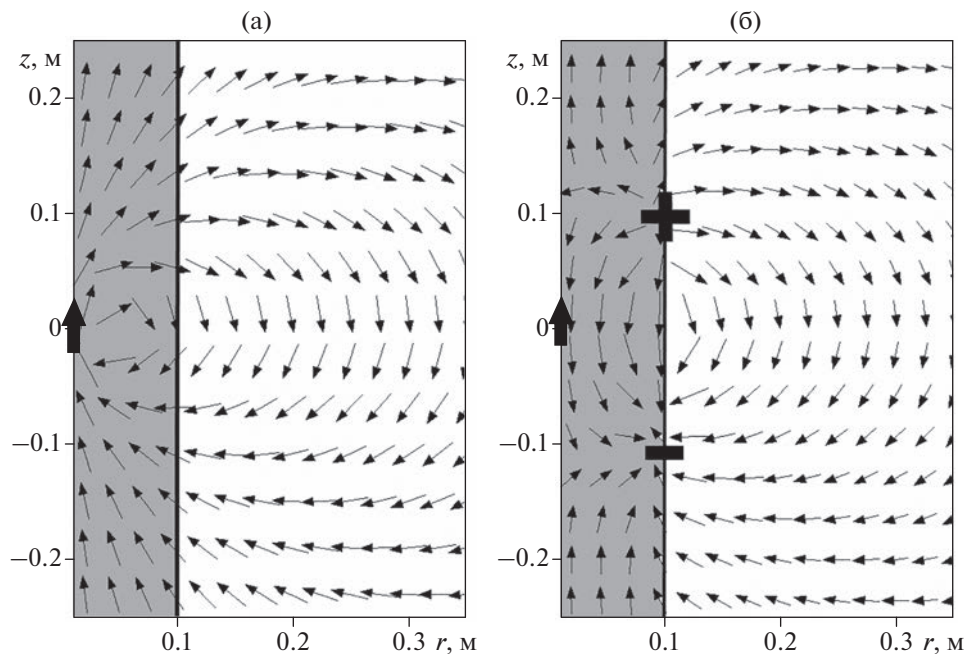


Рис. 4. Карты векторов электрического поля для модели скважины с водой в однородной поляризующейся среде ($\sigma = 1$ См/м; $\eta = 0.1$; $\tau = 10^{-3}$ с; $c = 0.5$) для разных моментов времени после выключения тока в диполе: (а) — $t = 0$ с; (б) — $t = 10^{-3}$ с.

ляризуется, в ней возникают сторонние токи противоположного первичному току направления. Сторонний ток не выходит из среды в скважину. Его нормальная компонента создает на стенке скважины распределенный поверхностный заряд, который поддерживается сторонним током и порождает в окружающей среде медленно спадающие токи ВП. Строгий расчет электромагнитного поля для данной задачи по работе [Каринский А., 1998] позволяет построить карты векторов электрического поля для разных моментов времени после выключения тока. На рис. 4а показана карта векторов первичного поля. Начиная с некоторого момента после выключения тока, когда закончатся все индукционные процессы в среде, поле E выйдет как на рис. 4б. И в скважине, и вблизи нее электрическое поле полностью определяется процессами ВП.

Из конфигурации направления векторов можно понять, где расположена основная плотность распределенных по границе макрозарядов разного знака. Они показаны на рис. 4б на стенке скважины. Именно эти заряды являются источником поля ВП на поздних временах после выключения и со временем релаксируют со скоростью, определяемой поляризационными параметрами. А возникли они во время длительного пропуска тока, имеют гальваническую природу и поддерживаются сторонними токами в поляризованной среде. Обращаем особое внимание на то, что на оси скважины на малых разностях, сопостави-

мых с радиусом скважины, поле ВП меняет знак. А для разностей, превышающих радиус скважины, поле ВП совпадает по направлению с первичным полем.

Рассмотрим теперь двухслойную морскую модель среды с поляризующимся основанием с параметрами, приведенными на рис. 5. Рассмотрим две осевые установки с короткой генераторной линией (рис. 5а) и с очень длинной линией с электродом В, отнесенным в “бесконечность” (рис. 5б). Достаточно очевидна конфигурация токовых линий при пропускании тока в источнике j_0 для обеих установок, которая схематично показана на рис. 5 вместе с направлением j_{ct} в поляризуемом основании. Сторонний ток не может выйти из поляризующейся среды в воду и, следовательно, его нормальная компонента создает на границе раздела (на дне) неоднородно распределенные поверхностные заряды разного знака. Как видим, расположение участков с максимальной плотностью этих зарядов будет зависеть от мощности первого слоя и от размеров источника. Для короткой линии АВ, как и для диполя в скважине, эти участки расположены на удалении от АВ, примерно равном мощности h_1 . Поэтому, как и в предыдущем примере со скважиной, знак поля ВП на поверхности на малом разnose для M_1N_1 и на большом разnose (больше h_1) для M_2N_2 будет разным. Из рис. 5б очевидно, что для трехэлектродной установки АМN максимальная плотность зарядов образуется на границе под электро-

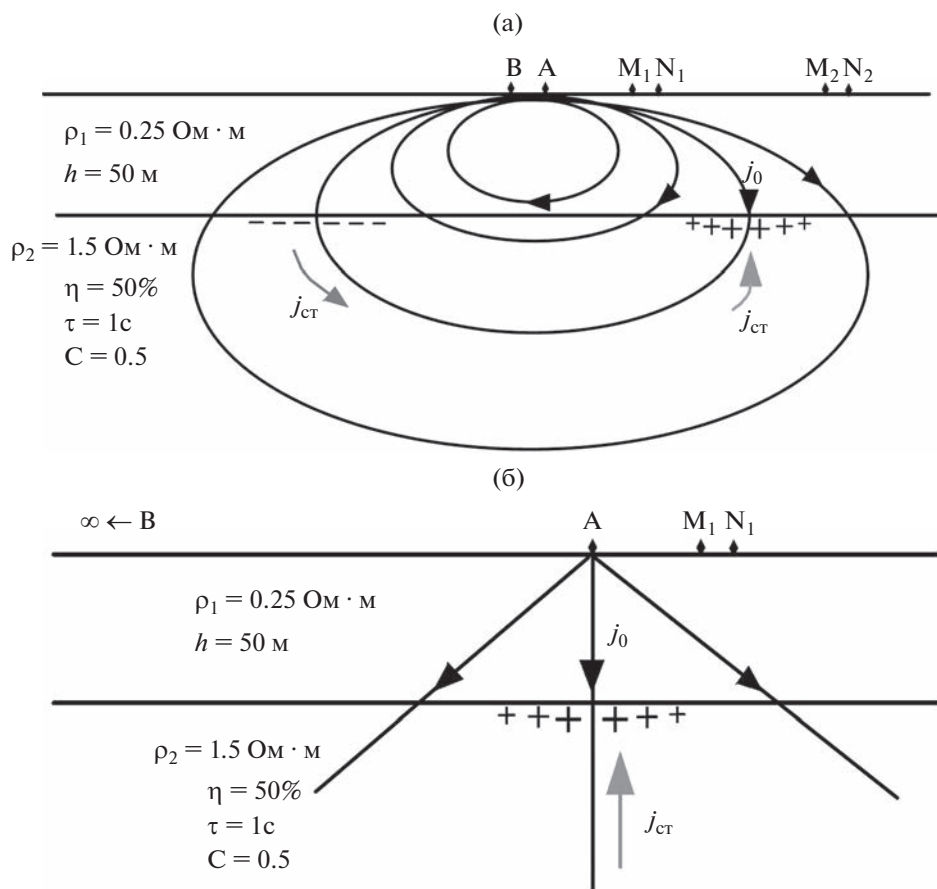


Рис. 5. Схема распределения токов j_0 и j_{CT} с образованием поверхностных зарядов для двух осевых установок: (а) — для дипольной установки; (б) — для трехэлектродной установки.

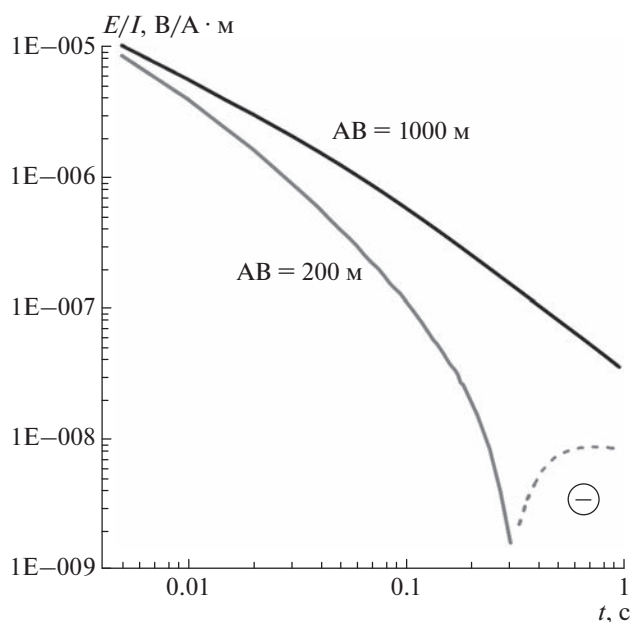


Рис. 6. Переходные характеристики электрического поля над двухслойным морским разрезом для двух установок с линией $AB = 200$ м и $AB = 1000$ м.

дом А и смены знака ВП при увеличении разноса ожидать не приходится.

Справедливость этих рассуждений подтвердим строгими расчетами для описанной двухслойной морской модели для двух конкретных осевых установок с малым $AB = 200$ м и большим $AB = 1000$ м. В обоих случаях линия MN удалена от ближайшего генераторного электрода на 30 м (при глубине моря 50 м). Полученные переходные характеристики электрического поля приведены на рис. 6. Как и следовало ожидать, при большой линии $AB = 1000$ м кривая становления не меняет знак. А при $AB = 200$ м и малом разnose на поздних временах наблюдается смена знака поля ВП. Заметим, что при большом удалении MN для этой же задачи с $AB = 200$ м смены знака не будет.

Итак, мы рассмотрели проявление вызванной поляризации на двух примерах слоистых моделей. Показали, что смена знака переходного процесса ВП при определенных соотношениях разносов, мощностей и размеров источника полностью объясняется нашими представлениями о физических процессах в среде, имеет гальваническую

природу и не является “визуальным признаком” ВПИ.

Если сторонние токи не пересекают поверхности поляризующегося тела, как в случае с возбуждением горизонтально слоистой поляризующейся среды горизонтальной генераторной петлей, то и заряды на границах не возникают. В пластах индуцированный в них ток проводимости также порождает сторонний ток противоположного направления. Однако он не сопровождается электрическим полем, не создает токов ВП и проявляется только в магнитном поле, порождаемом сторонними токами. Электрическое поле ВП возникает только в результате индукции связанного с поляризацией магнитного поля.

Необходимо сделать одно важное замечание. При рассмотрении двух простейших моделей однородного поляризующегося полупространства и двухслойной среды с поляризующимся основанием показано, что источниками поля ВП являются поверхностные заряды на генераторных электродах АВ или на границе слоев, соответственно. Может сложиться впечатление, что в этих примерах поле ВП характеризует только приэлектродную область в первом случае, или глубинность метода ВП ограничена только мощностью первого слоя во втором. Это не так. Поверхностные заряды определяют измеряемое поле ВП, но порождаются и поддерживаются эти заряды сторонними ЭДС и сторонним током во всей охваченной первичным полем поляризующейся среде и поэтому отражают поляризационные свойства разреза на глубину, определяемую разносом установки. Если поляризованных слоев несколько, то на каждой границе будут формироваться свои поверхностные заряды, дающие свой вклад в суммарное поле ВП.

ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ДЛЯ МОРСКОЙ МОДЕЛИ

Электрическая линия — смешанный источник, имеет и гальваническую и индукционную составляющие. Соответственно вихревые токи в поляризующейся среде приводят к образованию ВПИ наравне с ВПГ. В простейшем случае из аналитики для электрического диполя в ближней зоне над однородным поляризующимся полупространством этот член разного знака с электродинамическим становлением и существенно меньше по интенсивности, чем ВПГ. То есть при решении прямой задачи можно, в частности, ожидать проявление ВП на кривой спада со смешанной природы, как индукционной природы, так и гальванической. Как же ответить на вопрос, какой процесс отвечает за это проявление — ВПГ или ВПИ?

Для этого, учитывая разные зависимости ВПГ и ВПИ от разных параметров разреза и установок, поставим несколько численных экспериментов с изменением таких параметров, от которых проявление ВП существенно отличается для ВПГ и ВПИ.

Рассчитаем кривую спада для двухслойной морской модели среды с параметрами из статьи [Агеенков и др., 2022]. Вода $0.25 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, глубина моря 50 м, ниже поляризующееся основание $1.5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ с поляризуемостью 50%, $\tau = 1 \text{ с}$, $C = 0.5$. Осевая установка, генераторная линия 200 м, на удалении 30 м от электрода В измеряется поле E . Длительность импульса и паузы по 1.5 сек.

Теперь давайте введем в модель еще один промежуточный очень тонкий слой изолятора с УЭС $10000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и мощностью всего 1 м на дне. Для индукционных токов он не является преградой и если наблюдаемая для 2х-слойки ВП имеет индукционную природу, то введение прослойки изолятора не должно ничего принципиально изменить по сравнению с 2х-слойкой. Зато гальванический ток во время импульса пропускания мы гарантированно не пропускаем в поляризующееся основание и исключаем ВПГ. И если в этой модели наблюдаемая ВП исчезнет, то это будет свидетельствовать о том, что наблюдаемая ВП в модели 2х-слойки имеет гальваническую природу.

Результаты расчетов приведены на рис. 7. Для 2х-слойной модели с поляризующимся основанием на временах более 0.3 с наблюдается смена знака — отрицательное проявление ВП. Именно его природу мы пытаемся понять. Для 3х-слойной модели с промежуточным изолятором ВП практически исчезло. Кривая становления слабо отличается от соответствующих кривых без поляризации основания. Т.е. введение тонкого изолятора “убило” ВП. Еще раз отметим, что если удалить точку наблюдения не на 30 м, а более 60–70 м, то над двухслойной моделью с поляризацией была бы интенсивная положительная ВП, которая бы тоже исчезла с введением изолятора.

Логично сделать вывод, что наблюдаемые отрицательные значения ВП над двухслойной моделью имеют гальваническую природу, основание поляризуется гальваническими токами во время пропускания тока.

Результат еще одного модельного эксперимента приведен на рис. 8. Здесь показано, как зависит интенсивность отрицательных значений ВП от УЭС промежуточного высокоомного слоя при его мощности 10 м. Так как слой-изолятор с $h = 10 \text{ м}$ существенно затрудняет проникновение первичного гальванического тока в поляризующееся основание, то отрицательные значения ВП проявляются только на более поздних временах по сравнению с предыдущей задачей, когда индукционное поле уже существенно спадает. Поэтому

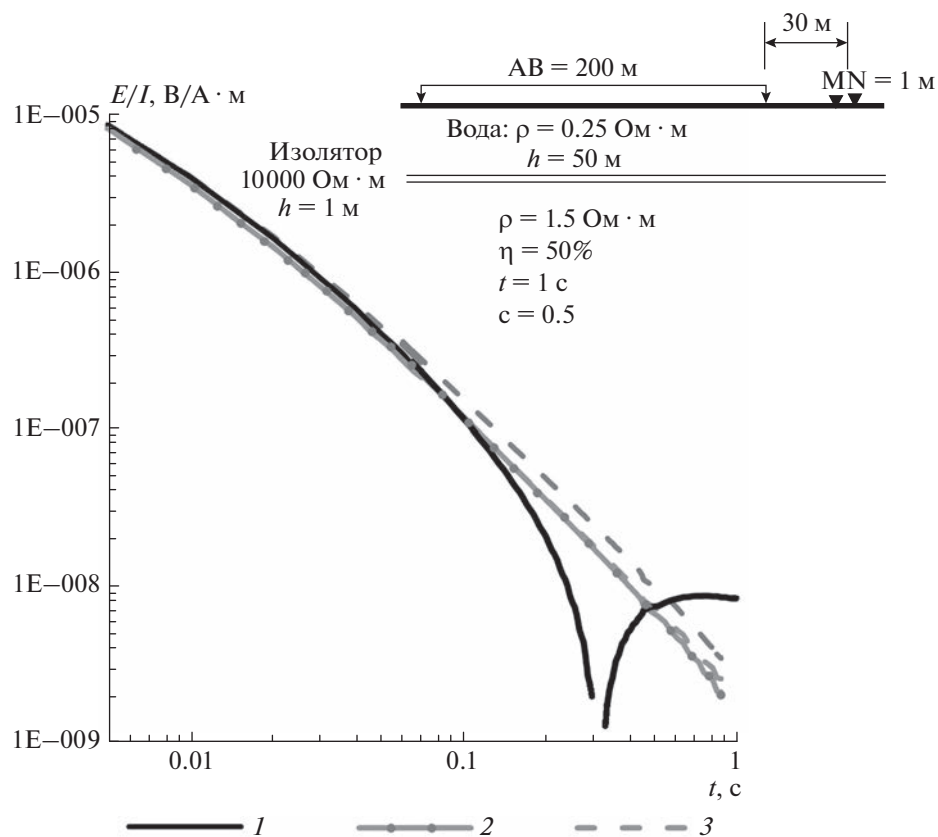


Рис. 7. Переходные процессы для 2х-слойной и 3х-слойной моделей и установки, показанной на рисунке: 1 – 2х-слойная модель с поляризующимся основанием; 2 – 3х-слойная модель с тонким слоем изолятора на дне; 3 – те же модели без поляризации.

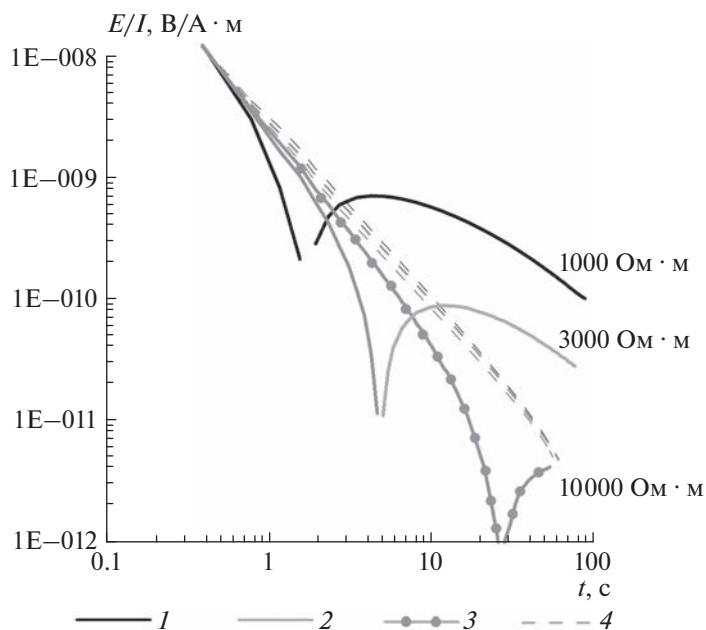


Рис. 8. Переходные процессы для 3х-слойной модели и установки, показанной на рисунке 7, с промежуточным высокоомным слоем мощностью 10 м с разным удельным электрическим сопротивлением: 1 – УЭС = 1000 Ом·м; 2 – УЭС = 3000 Ом·м; 3 – УЭС = 10000 Ом·м; 4 – те же модели без поляризации.

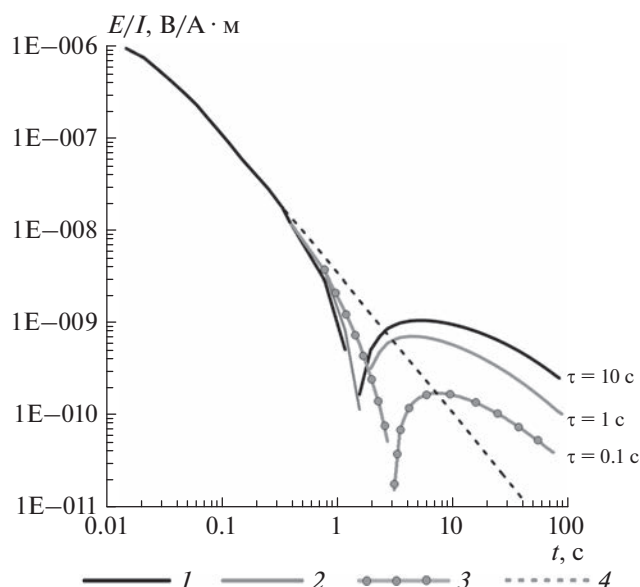


Рис. 9. Переходные процессы для 3х-слойной модели и установки, показанной на рис. 7, с промежуточным высокоомным слоем мощностью 10 м и УЭС=1000 Ом·м с разными постоянными времени поляризации: 1 – $\tau = 10$ с; 2 – $\tau = 1$ с; 3 – $\tau = 0.1$ с; 4 – та же модель без поляризации.

временной диапазон, длительность импульса тока и паузы выбран до 100 с.

Результат эксперимента очевиден. Чем больше УЭС промежуточного слоя, тем меньше первичный гальванический ток проникает под него и поляризует основание. Тем слабее интенсивность отрицательных значений ВП. Кривые для всех трех моделей без поляризации практически совпадают. И в этом случае наблюдаемые закономерности свидетельствуют о гальванической природе отрицательных значений ВП.

Можно рассмотреть еще один модельный пример с зависимостью интенсивности отрицательной ВП от постоянной времени поляризации τ . Гальваническими токами среда поляризуется в течение всего времени пропускания импульса тока, в нашем случае это 100 с. При индукционном возбуждении поляризация осуществляется вихревым электрическим полем после выключения импульса, которое достаточно быстро спадает. Если процессы ВП очень медленные (τ очень большая), то короткое поляризующее воздействие вихревых токов не успевает полностью поляризовать среду. В этом случае естественно ожидать, что интенсивность ВПИ будет падать с ростом τ . Напротив, для ВПГ длительное пропускание тока позволяет добиться предельной поляризации для всех τ , которые меньше длительности импульса тока. На рис. 9 для модели из предыдущего примера приведены кривые для трех τ . Для $\tau = 0.1$ с значения отрицательного ВП

меньше, чем в других случаях, из-за того, что к времени 3 с быстрый процесс ВП уже существенно спал. Однако вид кривых для $\tau = 10$ и 1 с говорит о том, что они близки к своей предельной поляризации и ВП для $\tau = 1$ с чуть быстрее спадает.

По нашему мнению, полученные закономерности проявления отрицательной ВП от параметров разреза во всех трех приведенных численных экспериментах свидетельствуют о том, что вызывается отрицательная ВП гальваническими токами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере простых моделей среды показано, где образуются поверхностные заряды, которые являются источником поля ВПГ и которые поддерживаются сторонними токами в поляризованном объекте и релаксируют вместе с ними в соответствии с поляризационными параметрами среды.

Положение точки измерения относительно мест расположения этих зарядов определяет направление электрического поля ВП и, следовательно, знак поля ВП на переходных характеристиках.

Для морской модели с геометрией установки, при которой проявляется отрицательная ВП, выполнены три численных эксперимента для определения зависимостей интенсивности проявления отрицательной ВП от характерных параметров модели, для которых из физических соображений можно ожидать существенно разных зависимостей для ВПГ и ВПИ. Полученные закономерности убедительно свидетельствуют о том, что для этих моделей отрицательная ВП имеет гальваническую природу и не является визуальным признаком ВПИ.

Для других более сложных моделей или других разностей для осевой установки тоже можно получить смену знака на переходном процессе, связанную с ВП. Но без специальных расчетов трудно представить, как будут распределены по границам заряды, вызываемые сторонними токами и какие поля ВП они сформируют. Поэтому нельзя заранее утверждать, что всегда мы имеем дело с проявлением только ВПГ. В каких-то случаях это, возможно, будет и проявление ВПИ. Главное, что показано — это то, что отрицательные значения ВП на кривой спада для осевой установки не являются визуальным признаком только ВПИ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Некоторые результаты, изложенные в статье, получены в рамках работ по теме НИ РАН «Комплексный глубоководный и наземный мониторинг с целью изучения и прогнозирования крупномасштабных природных

процессов и глубинного зондирования Земли”, код научной темы FMWU-2022-0022.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агеев В.В., Каринский С.Д., Светов Б.С. Об определении параметров Cole-Cole в поляризующихся средах // Геофизика. 2006. № 5. С. 40–45.

Агеев 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. 2022. № 2. С. 224–240.

Каринский А.Д. Решение осесимметричной прямой задачи теории каротажа КС при возбуждении поля переменным током // Геофизика. 1998. № 2. С. 20–28.

Каринский С.Д. Квазистатический метод расчета переходных процессов вызванной поляризации // Физика Земли. № 2. 2011. С. 27–34.

Кауфман А.А., Андерсон Б.И. Принципы методов наземной и скважинной электроразведки. Тверь: АИС. 2013. 488 с.

Кормильцев В.В. Вызванная поляризация в уравнениях электродинамики. Свердловск. 1981. 44 с.

Светов Б.С., Агеев В.В., Агеева О.А., Каринский С.Д. О связи феноменологического описания вызванной поляризации среды с происходящими в ней физическими процессами. Постановка вопроса // Геофизика. 2011. № 4. С. 25–29.

Титов К.В. Электрокинетические явления горных пород и их применение в геоэлектрике. Дис. ... докт. геол.-мин. наук. С.-Пб. 2003.

Шестернев Д.М., Карасев А.П., Оленченко В.В. Исследование криолитозоны методом РСВП. Новосибирск. СО РАН. 2003. 238 с.

On the Nature of Negative Values of Induced Polarization in the Transient Electromagnetic Process when Working with an Axial Electrical Installation on the Sea Shelf

V. V. Ageev*

Geoelectromagnetic Research Center, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Troitsk, 108840 Russia

**E-mail: ageevvv@yandex.ru*

The paper describes the ideas about the sources of induced polarization fields generated by external forces of non-electrical origin. Layered polarizable media are considered, over which a change in the sign of induced polarization can be observed for an axial electrical installation. Numerical model experiments substantiate the conclusion that the induced polarization is caused by galvanic currents and is not related to the induction component in this case.

Keywords: induced polarization, frequency dispersion, external currents, transient process, axial electrical installation