

О ПРОЯВЛЕНИИ ПРОЦЕССОВ ИНДУКЦИОННОГО СТАНОВЛЕНИЯ И ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПРИ РАБОТЕ С ОСЕВОЙ И СИММЕТРИЧНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

Е.В. Агеенков^{1,2}, А.А. Ситников¹, И.Ю. Пестерев¹, А.В. Попков¹

¹ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания», 664044, Иркутск, ул. Щапова, 14, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Рассмотрено проявление электромагнитного (ЭМ) сигнала над проводящей поляризуемой землей на измерительных линиях, расположенных на оси источника и внутри него (для симметричной установки Шлюмберже).

Исследование основано на численном эксперименте. Проводились расчеты ЭМ отклика от одномерных моделей. Учет поляризуемости реализован введением частотно-зависимого удельного электрического сопротивления моделью Коул-Коул.

Описаны результаты численного эксперимента по расчету сигнала становления над проводящей поляризуемой средой на двух- и трехэлектродных заземленных измерительных линиях, расположенных в осевой и экваториальной области источника — заземленная линия. Показано различие проявления индуктивного сигнала (становления поля) и сигнала вызванной поляризации, связанного с гальваническим и вихревым током.

Электромагнитные зондирования, заземленная линия, трехэлектродная заземленная измерительная линия, зондирования проводящих поляризующихся сред, модель Коул-Коул, индукционно-вызванная поляризация (ВИП), гальванически-вызванная поляризация (ВПГ), прямая задача для проводящей поляризуемой среды.

MANIFESTATION INDUCTION AND INDUCED POLARIZATION IN THE CASE OF AXIAL AND SYMMETRICAL ELECTRICAL ARRAYS

E.V. Ageenkoy, A.A. Sitnikov, I.Yu. Pesterev, and A.V. Popkov

The paper considers the manifestation of electromagnetic (EM) signal over the conducting polarizable ground on the measuring lines located on the axis of the source and inside it (for the symmetric Schlumberger installation).

The research is based on a numerical experiment. Calculations of the EM response from one-dimensional models were carried out. The polarizability is taken into account by the frequency-dependent resistivity, using the Cole-Cole model.

We describe the results of a numerical experiment on calculation of the induction signal over a conductive polarizable medium on grounded 2- and 3-electrode measuring lines located in the axial and equatorial zones of the source. It is shown that the induced polarization and the polarization associated with galvanic and eddy current are manifested in different ways.

Electromagnetic sounding, grounded electrical line, grounded 3-electrode measuring line, sounding of conductive polarizable media, Cole–Cole model, induced polarization (IP), galvanic polarization (GP), forward modeling for a conductive polarizable medium

ВВЕДЕНИЕ

Геологическая среда с точки зрения современной геоэлектрики представляется многофазным гетерогенным образованием, обладающим дисперсией ЭМ свойств. Ряд релаксационных процессов сопровождается возникновением ЭМ сигнала, который накладывается на индуктивный ЭМ сигнал становления поля (СП). Общий сигнал может быть зарегистрирован электроразведочными измерителями на поверхности или внутри среды.

Изучение ЭМ сигнала, связанного с релаксационными процессами, различными электроразведочными методами позволяет получить дополнительную информацию о свойствах геологической среды: пористости, влажности, степени сортировки частиц или о присутствии мерзлых образований или примесей, воздействию УВ.

Искусственный импульсный источник ЭМ поля используется в электроразведке для возбуждения переходного процесса в геологической среде, сопровождающегося релаксационными процессами. Наиболее распространенные искусственные источники — заземленная электрическая линия и индуктивная (незаземленная) петля, их воздействие на изучаемую среду различно. Заземленная линия в импульсном режиме создает в проводящей среде гальванический и вихревой ток. Петля воздействует только индуктивно, создавая вихревой ток. Эти токи порождают изменения в среде, которые при возвращении среды в первоначальное равновесное состояние сопровождаются ЭМ сигналами, характеризующими эти процессы. Соответственно, для заземленной линии будут возникать процессы вызванной поляризации (ВП), связанные как с гальваническим, так и вихревым током, для петли — релаксационные процессы, связанные только с вихревым током. На измерителях будет проявляться общий сигнал.

Проявление сигнала ВП после импульсного воздействия для электрических линий, находящихся в осевой [Комаров, 1980] и экваториальной [Вишняков и др., 1988; Петров, 2000] областях источника, исследовалось неоднократно, однако не проводилось разделение, какой ток порождает релаксационные процессы, гальванической или вихревой, или той и другой природы.

Проявление сигнала индукционно-вызванной поляризации (ВПИ) изучалось для индуктивной установки [Компаниец и др., 2013; Кожевников и др., 2014; Каменецкий и др., 2014; Халлбауэр-Задорожная, 2016; и др.], для заземленных электрических линий этот вопрос исследовался меньше [Легейдо, 1998; Моисеев, 2002]. П.Ю. Легейдо предложил ряд геоэлектрических моделей, основанных на геологических условиях юга Сибирской платформы, в которых ВП связана с гальваническим и вихревым током. Развивая эту тему, было проведено численное моделирование для осевой и симметричной электрических установок, в публикации описаны результаты моделирования и предложена интерпретация полученных результатов.

Более сложный переходный процесс от источника заземленная линия требует более подробного рассмотрения. Становление и вызванная поляризация, связанные с гальваническим и вихревым током, по-разному проявляются на измерителях, размещенных в осевой и экваториальной областях источника. Такие различия необходимо знать для правильного планирования натуральных измерений и понимания их результатов.

ЭМ поле во время переходного процесса рассчитывалось на двух- и трехэлектродных [Легейдо и др., 1995, 1997] измерительных линиях. Для двухэлектродных линий рассчитывался сигнал переходного процесса, для трехэлектродных линий — сигнал переходного процесса, вторая конечная разность сигнала переходного процесса и трансформанта ЭМ поля — их отношение [Легейдо и др., 1995, 1997]. Известно, что такое трансформирование сигналов, измеренных в осевой области источника, позволяет уменьшить проявление индукционной составляющей переходного процесса в поздней стадии становления. С этого момента поведение трансформанты определяется гальванически-вызванной поляризацией. Описание проявления в трансформанте сигнала, связанного с индукционно-вызванной поляризацией, еще одна задача, которая стоит перед этим исследованием.

ЗЕМЛЯ — МНОГОФАЗНАЯ ГЕТЕРОГЕННАЯ СРЕДА

В геологической среде переменное ЭМ поле распространяется диффузионно, проникновение поля внутрь земли сопровождается возникновением вихревого тока и вторичного ЭМ поля. Течение вихревого тока вызывает ряд различных процессов разделения зарядов. На фоне затухания вихревого тока, вследствие тепловых потерь, как ЭМ сигнал проявляются релаксационные процессы.

Протекание гальванического тока в этой среде сопровождается аналогичными явлениями, в конечном итоге так же проявляющимися, как ЭМ сигнал.

С точки зрения современной геоэлектрики геологическая среда представляется проводящим многофазным гетерогенным образованием, обладающим дисперсией ЭМ свойств, которая вызвана протеканием ряда релаксационных процессов (инерционных процессов, характеризующихся временем релаксации) на границах фаз или внутри областей с контрастными изменениями ЭМ свойств.

Дисперсия ЭМ свойств, проявляющаяся в электроразведочных измерениях в разных диапазонах времени регистрации (или частотных диапазонах), в геоэлектрике имеет несколько обозначений: эффект вызванной поляризации (ВП) или низкочастотной дисперсии (НЧД) [Каменецкий, 1997], релаксация Максвелла—Вагнера [Сидоров, 1987; Губатенко, 1991] диэлектрическая релаксация Дебая [Кожевников, 2012] и ориентационная поляризация, свойственная диэлектрикам [Аузин, Зацепин, 2015]. Эти эффекты проявляются на временах от наносекунд — ориентационная поляризация [Аузин, Зацепин, 2015], до сотен миллисекунд и секунд — ВП [Комаров, 1980; Халлбауэр-Задорожная, 2016].

Для описываемого численного эксперимента учет эффектов вызванной поляризации осуществлен введением частотно-зависимого удельного электрического сопротивления (УЭС). Частотная дисперсия УЭС описывалась моделью Коул-Коул (1) [Могилатов, 2014]:

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

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

ИНДУКЦИОННО-ВЫЗВАННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ИНДУКТИВНЫМ ИСТОЧНИКОМ

Первые исследования проявления сигнала ВП в электрометрических измерениях были связаны с заземленными электрическими линиями, главным образом после воздействия гальванического тока на многофазную геологическую среду регистрировались проявления электрохимических и электрокинетических процессов [Комаров, 1980; Жданов, 2012]. При измерениях индуктивными установками и импульсным возбуждением переходного процесса отмечались немонотонные спады — вплоть до смены полярности сигнала, которые невозможно было описать диффузионным распространением ЭМ поля в проводящей среде [Кожевников, 2012]. Первоначально объяснение этому эффекту было найдено на основе макроскопически гетерогенной среды и связано с проявлением эффекта Максвелла—Вагнера в мерзлых породах с частотно-независимыми удельной проводимостью (σ) и диэлектрической проницаемостью (ϵ) [Сидоров, 1987]. Затем было показано, что в ряде случаев и в первую очередь применительно к условиям криолитозоны аномальные переходные характеристики удается объяснить в рамках модели однородной геологической среды, содержащей вещества с полярными молекулами, и теории диэлектрической релаксации Дебая [Кожевников, 2012; Кожевников и др., 2014].

ВПИ возникает при воздействии на поляризующуюся среду вихревого тока (рис. 1, а). Ее проявление в ЭМ сигнале хорошо видно при индуктивном возбуждении и приеме поля становления (ПС) (во временной области). В результатах измерений зондированием методом переходных процессов (ЗМПП) с соосными установками ВПИ проявляется как сигнал противоположного знака в отличие от становления ЭМ поля. ВПИ может быть связана с рядом релаксационных процессов различной природы. Наиболее быстропротекающая релаксация наблюдается в мерзлых породах. Она проявляется на временах от первых микросекунд до первых миллисекунд. Более инерционные процессы электрокинетической и электролитической природы. Электрокинетические процессы — электроосмос и мембранная поляризация, связанные с двойным электрическим слоем (ДЭС) двухфазной пористой среды и изменениями диаметров пор. Длительность электроосмотической релаксации от первых миллисекунд до сотен миллисекунд. Мембранная поляризация устанавливается от миллисекунд до секунд [Халлбауэр-Задорожная, 2016]. Электролитические процессы связаны с присутствием электронно-проводящих включений внутри пористой (трещиноватой) геологической среды. Они длятся от первых миллисекунд до секунд.

Проявление электрофизической релаксации в индуктивных измерениях называют быстропротекающая индукционно-вызванная поляризация (БВПИ) [Кожевников, 2012]. Есть данные о быстропротекающей вызванной поляризации (БВП) в измерениях с заземленными линиями [Карасев и др., 2005]. Проявление электрокинетической и электролитической релаксации называют низкочастотная дисперсия (НЧД) или вызванная поляризация [Каменецкий, 1997].

Для индукционного возбуждения и приема неустановившегося ЭМ поля характерно возбуждение только вихревых токов, которые, протекая в поляризующейся среде, возбуждают ВПИ, связанную с релаксационными процессами различной природы. Но плотность вихревых токов меньше, чем гальва-

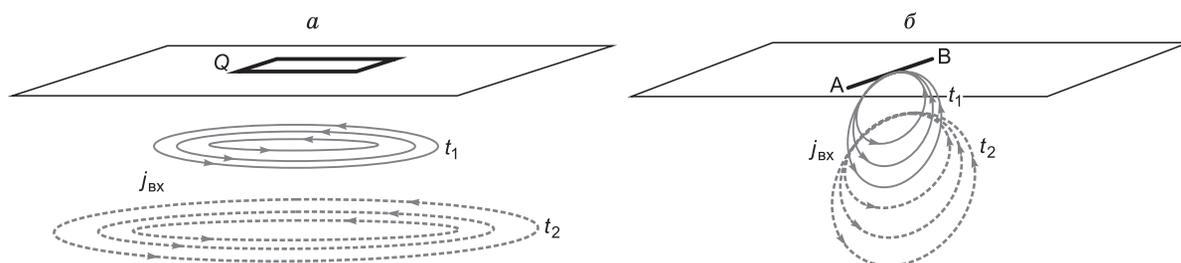


Рис. 1. Упрощенная структура вихревых токов:

а — для источника индуктивная петля (Q); б — для источника заземленная линия (AB). $j_{\text{вх}}$ — основная плотность вихревого потока, t_1, t_2 — моменты времени, для которых показана плотность вихревого тока.

нических, и время их протекания в земле меньше, чем гальванических, поэтому для изучения ВП такая система возбуждения и приема применяется редко. Можно утверждать, что процессы ВПИ, как правило, являются мешающими для изучения процесса становления индуктивными установками.

При индуктивном возбуждении и приеме ЭМ сигнала переходного процесса поляризация, вызванная вихревым током — индукционно-вызванная поляризация, проявляется в смене знака ЭДС.

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ПРОВОДЯЩЕЙ ПОЛЯРИЗУЮЩЕЙСЯ СРЕДЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕЕ ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА — ЗАЗЕМЛЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЛИНИИ

Заземленная электрическая линия воздействует на проводящую поляризующуюся среду несколько по-другому нежели индуктивный источник [Могилатов, 2014]. При подаче разности потенциалов на питающие электроды в среде устанавливается потенциальное ЭМ поле, вызывающее течение гальванического тока. Распределение плотности тока в среде зависит от ее проводимости, а также размеров источника и убывает с глубиной и при горизонтальном удалении от источника. Возникновение гальванического тока приводит к разделению зарядов в геологической среде, длящееся определяемое время. Появляется поле ВП, противодействующее потенциальному полю заземленного источника. Это проявляется в изменяющейся разности потенциалов на измерителе во время токового импульса после включения тока и в осевой, и в экваториальной области источника. Разность потенциалов растет и при достаточной продолжительности импульса может достигнуть асимптоты — разности потенциалов на постоянном токе.

Во время импульса тока в нижнем полупространстве ток течет от электрода А к электроду В (для импульсов одной полярности), в кабеле источника от электрода В к электроду А, замыкая токовое кольцо. Силовые линии постоянного магнитного поля, образующие магнитный поток Φ_1 , охватывают токовые линии. Ток I , текущий в кабеле, растекается в нижнем полупространстве с неравномерной плотностью. В экваториальной области источника она начинает резко уменьшаться на глубине приблизительно $AB/2$ [Матвеев, 1990]. В осевой области источника плотность тока убывает с увеличением разноса, но глубина, до которой плотность тока практически не уменьшается, возрастает с увеличением разноса. Так называемая эффективная глубина зондирования на постоянном токе в осевой области источника оценивается в $1/4—1/10$ длины разноса [Матвеев, 1990].

После выключения питающего тока в среде начинаются изменения токов и ЭМ поля. Меняется направление поля ВП, теперь оно направлено так же, как и первичное потенциальное поле источника. Разделенные под воздействием внешнего тока заряды возвращаются в первоначальное положение, начинает течь ток гальванически вызванной поляризации, сопровождающийся возникновением ЭМ сигнала. Это процесс инерционный, а точнее ряд процессов различной природы, каждый из которых характеризуется временем релаксации, поэтому разность потенциалов на измерителях после выключения тока исчезает не сразу, а наблюдается спад ВП [Комаров, 1980].

Одновременно с выключением первичного тока в проводящей среде происходит индуктивный процесс диффузии вихревого тока. После выключения гальванического тока, текущего в проводе и в земле, начинает уменьшаться магнитный поток Φ_1 , пронизывающий этот контур. Благодаря явлению самоиндукции образуется магнитный поток Φ_2 , препятствующий уменьшению потока Φ_1 , направлен он в ту же сторону, что и первичный поток. Поток Φ_2 индуцирует вихревой ток, его пространственное распределение повторяет структуру гальванического тока везде, кроме экваториальной области источника, под кабелем, соединяющим электроды А и В, образуется область с противоположным направлением движения тока высокой плотности, создавая ток, эквивалентный току в кабеле в момент импульса и замыкающий кольцо вихревого тока. На симметричном измерителе разность потенциалов меняет свой знак на противоположный относительно разности потенциалов во время пропускания. Знак $\Delta U(t)$ на измерителе в осевой области источника не изменяется.

Первоначально вихревой ток, главным образом в области, где его плотность максимальна, удерживается в соленоидальной ловушке высокочастотным магнитным полем, которое препятствует его растеканию и проникновению вглубь [Матвеев, 1990], — это ранняя стадия переходного процесса (РСПП) (рис. 2, а). Когда магнитное поле ослабевает ток начинает просачиваться (диффундировать) внутрь проводящей среды (вглубь и вширь) — проходит процесс становления ЭМ поля (СП) (см. рис. 2, б). Вихревой ток стремится к равномерной плотности в среде (см. рис. 2, в).

Для наглядного представления изменения структуры вихревого тока для индуктивного и гальванического источника показано кольцо максимальной плотности вихревого тока для двух моментов времени переходного процесса (см. рис. 1). Кольцо вихревых токов для источника заземленная линия растекается вглубь, преимущественно в плоскости, перпендикулярной поверхности земли [Strack, 1992].

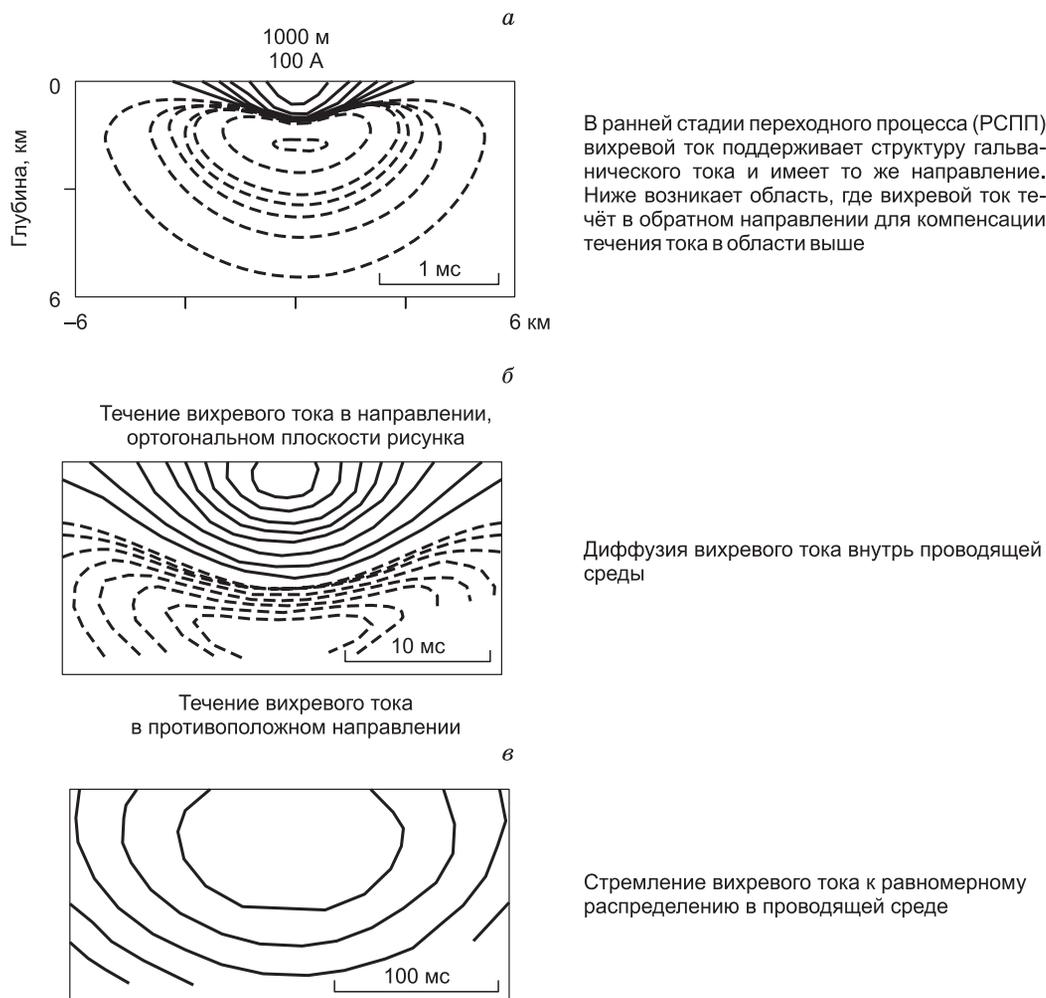


Рис. 2. Изолинии плотности вихревого тока в разные моменты переходного процесса, по [Strack, 1992].

Кольцо вихревых токов, созданных индуктивной петлей, диффундирует в глубь проводящей среды в плоскости, параллельной земной поверхности [Nabighian, 1979].

Возникающий вихревой ток также приводит к разделению зарядов в гетерогенной многофазной геологической среде, а когда он затухает вследствие тепловых потерь среда инерционно возвращается в первоначальное равновесное состояние, сопровождая это течением тока индукционно-вызванной поляризации и образованием ЭМ сигнала.

Таким образом, заземленная линия в импульсном режиме в проводящей поляризующейся среде порождает ток гальванически-вызванной поляризации — при включенном источнике, вихревой ток и ток индукционно-вызванной поляризации — после выключения источника, течение которых сопровождается возникновением ЭМ сигнала, регистрируемого на поверхности измерителями. Индукционная составляющая сигнала связана со вторичным ЭМ полем вихревого тока, текущего в проводящих областях геологической среды. Сигнал гальванически-вызванной поляризации связан с релаксационными процессами, вызванными гальваническим током. Сигнал индукционно-вызванной поляризации связан с релаксационными процессами, вызванными вихревым током.

ИЗМЕРИТЕЛИ — ЗАЗЕМЛЕННЫЕ ЛИНИИ И ТРЕХЭЛЕКТРОДНЫЕ ЗАЗЕМЛЕННЫЕ ЛИНИИ

Трехэлектродные измерительные линии ($M_1M_2M_3$, $M_2M_3M_4$, $M_3M_4M_5$, $M_4M_5M_6$) позволяют измерять сигнал переходного процесса между электродами $M_1—M_3$, $M_2—M_4$, $M_3—M_5$, $M_4—M_6$ и вторую конечную разность этого сигнала на трех электродах, затем формировать ряд трансформант ЭМ поля, позволяющих подавить вклад электродинамической составляющей в поздней стадии переходного про-

песса и усилить вклад гальванически-вызванной поляризационной составляющей. На основе расчетного сигнала переходного процесса между электродами $M_1—M_2$, $M_2—M_3$, $M_3—M_4$, $M_4—M_5$, $M_5—M_6$ можно сформировать разность потенциалов ΔU между крайними электродами каждой трехэлектродной измерительной линии (2), например для линии $M_1M_2M_3$, и вторую конечную разность сигнала переходного процесса $\Delta^2 U$ (3). Затем рассчитать трансформанту, названную P1, как отношение $\Delta^2 U$ к ΔU (4) [Легайдо и др., 1995, 1997; Легайдо, 1998].

$$\Delta U_{M_1M_3} = \Delta U_{M_1M_2} + U_{M_2M_3}, \quad (2)$$

$$\Delta^2 U_{M_1M_2M_3} = \Delta U_{M_1M_2} - \Delta U_{M_2M_3}, \quad (3)$$

$$P1_{M_1M_2M_3} = \frac{\Delta^2 U_{M_1M_2M_3}}{\Delta U_{M_1M_3}} = \frac{\Delta U_{M_1M_2} - \Delta U_{M_2M_3}}{\Delta U_{M_1M_2} + \Delta U_{M_2M_3}}. \quad (4)$$

В такой трансформации составляющая ЭМ поля, стремящаяся к однородности в пространстве, будет уменьшаться, а неоднородная в пространстве, напротив, будет приобретать больший вес (подчеркиваться).

ПРОЯВЛЕНИЕ СИГНАЛА ВП, СВЯЗАННОГО С ГАЛЬВАНИЧЕСКИМ И ВИХРЕВЫМ ТОКОМ, НА ЛИНИЯХ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В ОСЕВОЙ И ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ОБЛАСТЯХ ИСТОЧНИКА

Для электрических установок в режиме постоянного тока и импульсного возбуждения распространены установки с измерителями в осевой или экваториальной области источника. Установки с измерениями в осевой области часто называют дипольными, хотя разнос является небольшим и не позволяет пренебречь истинными размерами линий. Установки с измерителем в экваториальной области зачастую являются симметричными относительно центра источника.

Эффективная глубина зондирования на постоянном токе оценивается по расстоянию между источником и измерителем (для измерений в осевой области источника) и по размеру питающей линии (для измерений симметричной установкой).

Постоянный ток, созданный в среде заземленной электрической линией, растекается в нижнем полупространстве неравномерно, наибольшую плотность оценивают до глубины, сопоставимой с длиной разноса, — для измерений в осевой области источника или до половины длины источника — для измерений симметричной установкой.

Для источника заземленная линия известно, что измеряемый сигнал электродинамического переходного процесса и ВПГ для одномерной среды в осевой зоне источника имеют одинаковый знак, а в экваториальной зоне — разный [Вишняков и др., 1988; Петров, 2000; Моисеев, 2002; Антонов, Шеин, 2006].

Расчеты проведем для электрической установки с измерением в осевой и экваториальной областях источника (рис. 3), состоящей из источника АВ, нескольких измерительных линий M_1M_2 , M_2M_3 , M_3M_4 , M_4M_5 , M_5M_6 , расположенных в осевой области источника, и измерительной линии MN, размещенной в экваториальной области источника. Расстояние между центром питающей и измерительных линий: 1500, 2500, 3500, 4500 и 5500 м. Временной диапазон изучения сигнала ограничим от 100 мкс до 2 с.

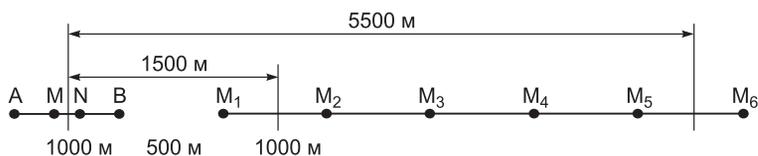
Для такой установки эффективная глубина зондирования на постоянном токе будет увеличиваться для измерений в осевой области и оцениваться от 300 до 1100 м. Для симметричной линии длиной 400 м при длине источника 1000 м она составит приблизительно 500 м.

Гальванический ток, растекаясь в земле с двух заземлений, создает потенциальное ЭМ поле, которое, в частности, в осевой области источника уменьшается при удалении от него. Токи вызванной поляризации, которые повторяют распределение в земле токов, вызвавших их, и ЭМ поле, созданное токами ВПГ, также будут сохранять неоднородность в осевой области источника.

При импульсном возбуждении, после изменения тока источника, в проводящей среде возникает вихревой ток. Для рассматриваемого источника в начале переходного процесса структура вихревого

Рис. 3. Схема установки численного эксперимента.

Измерительные линии в осевой (M_1M_2 , M_2M_3 , M_3M_4 , M_4M_5 , M_5M_6) и экваториальной (MN) области источника (AB).



тока будет повторять структуру гальванического тока (см. рис. 1, б). Переходный процесс связан с растеканием кольца основной плотности вихревых токов вниз и вширь (см. рис. 2), так что в поздней стадии его плотность равномерно распределяется в нижнем полупространстве, что проявится в уменьшении пространственной неоднородности индуктивного ЭМ поля, которая в поздней стадии переходного процесса будет близка к нулю.

Вихревой ток, диффундируя в проводящей среде, становится источником разделения зарядов. После его затухания заряды возвращаются в первоначальное положение, образуя ток индукционно-вызванной поляризации.

Становление поля, поляризация, вызванная как гальванически, так и индукционно, протекают совместно и проявляются как общий ЭМ сигнал на измерителях. Однако пространственное распределение плотности этих токов и ее изменение во время переходного процесса будут различаться, что дает надежду выделить составляющие из общего измеренного (рассчитанного) сигнала.

П.Ю. Легейдо [1998] предложил ряд геоэлектрических моделей, основанных на геологических условиях юга Сибирской платформы (табл. 1—4), в которых ВП связана преимущественно с гальваническим током («ВПГ»), преимущественно с вихревым током («ВПИ»), с двумя типами тока («ВПГ и ВПИ»), и модель, в которой ВП не образуется («Без ВП»). Четырехслойный горизонтально-слоистый геоэлектрический разрез типа КН — первый и третий, относительно проводящие слои разделены высокоомным экраном. В основании разреза лежит непроводящий фундамент. Можно предположить, что отклик ВП от первого слоя создается гальваническим и вихревым током, расположенный ниже экрана проводящий поляризующийся слой предположительно будет возбуждаться индуктивно и поляризационный отклик будет индукционным.

Поляризационные характеристики первого и третьего слоя значительно различаются. Для первого слоя поляризуемость равна 2 %, для третьего — 50 %. Такое, на первый взгляд, завышенное значение поляризуемости третьего слоя используется для увеличения эффекта ВП, связанного с ним. В предположении, что поляризационный эффект от этого слоя будет значительно слабее, а возможно, и совсем не проявится на фоне сигнала ВП, связанного с первым слоем, чтобы различить поляризационные составляющие, вызванные гальваническим и вихревым током, необходимо было придать резко отличающиеся ЭМ свойства подэкранной толще. Описываемое исследование можно считать предваряющим исследованием поляризационного отклика от геологических моделей на акваториях, когда поляризующиеся геологические слои перекрыты неполяризующейся водной толщей и эффект ВП связан только с ними. При большой мощности водной толщи и расположении источника и измерителя в верхних слоях воды гальваническое воздействие заземленного источника на геологические слои может быть незначительным, тогда знание о проявлении индукционно-вызванной поляризации в измеряемом сигнале позволит правильно интерпретировать результаты измерений.

Для изучения проявления ВПГ и ВПИ проведем сравнение сигналов над неполяризующейся средой, поляризующейся выше высокоомного второго слоя, поляризующейся ниже этого слоя и поляризующейся и выше, и ниже него. Условно назовем эти модели: «Без ВП», «ВПГ», «ВПИ» и «ВПГ и ВПИ» соответственно.

Для всех моделей первоначально покажем на графиках расчеты абсолютных значений (модуля) сигнала переходного процесса для линий M_1M_2 , M_2M_3 , M_3M_4 , M_4M_5 , M_5M_6 и симметричной линии MN (см. рис. 3).

Для соосных измерителей первоначально после выключения импульса выполняется условие волновой зоны. На них регистрируется отклик сигнала, распространившегося по воздуху как ЭМ волна и возбуждавшего в земле неустановившееся поле. Этот сигнал слабо изменяется — наблюдается асимптотическая ветвь на ранних временах, в нашем случае на интервале времени со 100 мкс до 1 мс. Такое поведение сигнала свидетельствует о РСПП. Уровень асимптоты зависит от разноса. Над неполяризующейся землей, после асимптоты РСПП наблюдается одинаковый монотонный спад сигнала становления поля на всех измерительных линиях (рис. 4, а). Со времени примерно 30 мс сигналы на всех измерительных линиях становятся практически равными — исчезает зависимость от разноса, это свидетельствует о равномерном распределении вихревых токов в земле. Этим характеризуется поздняя стадия становления ЭМ поля в среде.

Таблица 1. Модель «Без ВП»

Номер слоя	ρ , Ом·м	η , %	h , м
1	50	0	200
2	1000	0	500
3	20	0	200
4	1000	0	—

Таблица 2. Модель «ВПГ»

Номер слоя	ρ , Ом·м	η , %	τ , с	c	h , м
1	50	2	0.5	0.5	200
2	1000	0	—	—	500
3	20	0	—	—	200
4	1000	0	—	—	—

Таблица 3. Модель «ВПГ и ВПИ»

Номер слоя	ρ , Ом·м	η , %	τ , с	c	h , м
1	50	2	0.5	0.5	200
2	1000	0	—	—	500
3	20	50	0.5	0.5	200
4	1000	0	—	—	—

Таблица 4. Модель «ВПИ»

Номер слоя	ρ , Ом·м	η , %	τ , с	c	h , м
1	50	0	—	—	200
2	1000	0	—	—	500
3	20	50	0.5	0.5	200
4	1000	0	—	—	—

На линии MN (рис. 5) сигнал становления поля имеет противоположный знак относительно первичного поля.

Над землей, поляризующейся в верхней части разреза (см. рис. 4, б), на всех линиях спад отличается от спада над неполяризующимся разрезом и различие сигнала переходного процесса на них сохраняется на протяжении всего времени расчетов. На симметричной линии MN сигнал меняет знак (переходит из отрицательной области в положительную) со времени около 10 мс — так проявляется ВПГ.

При преобладании ВПИ (см. рис. 4, з) переходный процесс на измерителях значительно отличается. Сигнал на ближних измерительных линиях (разнос 1500 и 2500 м) после времени около 30 мс становится меньше, чем на более удаленных от источника линиях (разнос 3500, 4500 и 5500 м), их различие с течением времени увеличивается, после времени 70 мс ΔU на разnose 1500 м и после времени 300 мс

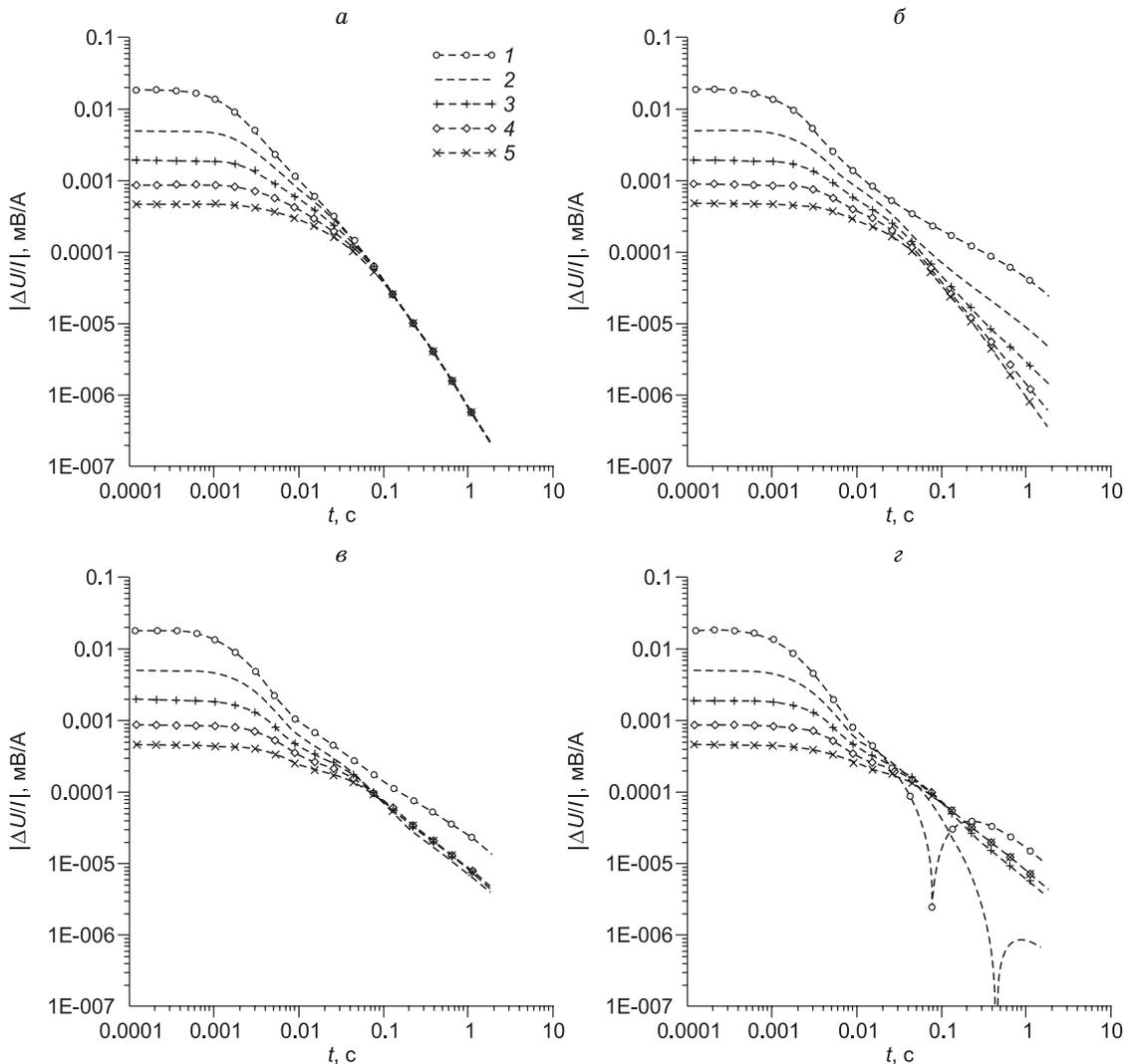


Рис. 4. Абсолютные значения сигнала переходного процесса на измерительных линиях, имеющих разнос 1500 (1), 2500 (2), 3500 (3), 4500 (4), 5500 (5) м:

а — над неполяризующейся средой; б — над средой, поляризующейся в верхней части разреза; в — над поляризующейся средой; з — над средой, поляризующейся под высокоомным экраном.

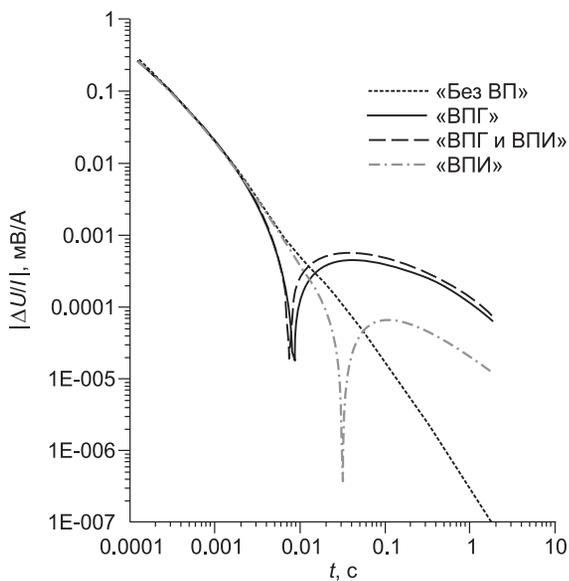


Рис. 5. Абсолютные значения сигнала становления от четырех моделей на симметричной измерительной линии.

ΔU на разnose 2500 м становятся отрицательными. На симметричной линии меняется знак сигнала аналогично случаю с предыдущей моделью, только время перехода через ноль увеличивается и происходит на 30-й мс, таким образом, можно констатировать, что так проявляется сигнал ВП, связанный с гальваническим током.

Увеличение эффективной глубины зондирования постоянным током установкой приводит к увеличению в регистрируемом сигнале доли вызванной поляризации, связанной с гальваническим током. Для измерителей, более удаленных от источника, смена знака сигнала переходного процесса не происходит. На малых расстояниях поляризационный отклик гальванически-возбужденной среды дойдет с небольших глубин (в со-

ответствии с оценкой глубинности проникновения постоянного тока для дипольной установки), а поляризационный сигнал, связанный с вихревым током, будет идти с больших глубин, при увеличении разноса отклик гальванически-вызванной поляризации регистрируется с больших глубин, и индукционно-вызванная поляризация не проявится во временном диапазоне, используемом для расчетов.

Над моделью с совместным проявлением ВПГ и ВПИ (см. рис. 4, в) сигнал переходного процесса с разносом 2500 м на времени порядка 100 мс становится меньше, чем на ближней и более удаленных измерительных линиях. С течением времени различие ΔU на этом разносе и ΔU на других линиях увеличивается, но смены знака разности потенциалов до времени окончания измерений (2 с) ни на втором, ни на других измерителях не отмечается. На симметричной линии смена знака сигнала происходит незначительно раньше, чем над моделью «ВПГ». Можно предположить, что незначительное увеличение временного диапазона преобладания сигнала ВП на индукционной составляющей связано с совместным влиянием двух поляризующихся слоев — наблюдается эффект наложения сигналов гальванически- и индукционно-вызванной поляризации (общий отклик).

Для другого представления данных можно объединить модули сигналов от всех моделей для каждой измерительной линии (рис. 6). Графики приведены в одном билогарифмическом масштабе. На них видны различия сигналов над неполяризующейся средой (пунктирная линия), над средой, поляризующейся в верхней части (сплошные линии), над средой, поляризующейся и в верхней части, и под высокоомным экраном (штриховые линии) и над средой, поляризующейся только под высокоомным экраном (штрихпунктирные линии). Различия сигналов изменяются в зависимости от разноса, их удобно рассматривать на фоне сигнала от неполяризующейся среды, который после времени 50 мс одинаков на всех разносах. Для самого ближнего разноса — 1500 м сигнал для поляризующейся под высокоомным экраном среды значительно отличается от других. Он переходит через ноль на времени 70—80 мс и приобретает отрицательные значения, поэтому сигнал над «ВПГ» больше, чем над «ВПГ и ВПИ». Общий сигнал над «ВПГ и ВПИ» уменьшается за счет отрицательных значений индукционно-вызванной поляризации.

Для разноса 2500 м картина сохраняется, только отрицательные значения ВПИ становятся на порядок меньше по амплитуде, и переход через 0 наблюдается позднее — на времени 300—400 мс. Меньше и различие сигналов «ВПГ» и «ВПГ и ВПИ».

При разносе 3500 м происходит кардинальное перераспределение откликов. Сигнал от модели, поляризующейся под экраном не меняет знак на протяжении всего времени расчетов. Сигнал от модели «ВПГ» после 30-й мс становится меньше сигналов от моделей «ВПИ» и «ВПГ и ВПИ».

Для разноса 4500 м амплитуда сигнала от модели «ВПГ» уменьшается по сравнению с предыдущим разносом, а сигнал от модели «ВПИ» приближается к сигналу от модели «ВПГ и ВПИ».

При удалении измерителя от источника на 5500 м сигнал от модели «ВПГ» практически сливается с сигналом от неполяризующейся среды, то же происходит и с откликами от моделей «ВПИ» и «ВПГ и ВПИ».

Для симметричной установки с самых ранних времен наблюдается спад сигнала. По интерпретации Б.К. Матвеева [1990], для индуктивного источника и приемника, если измеритель располагается вне кольца максимальной плотности вихревых токов, то он находится в условиях дальней зоны (ДЗ), если оказывается внутри этого кольца, регистратор сигнала оказывается в условиях БЗ. Для заземленной линии ситуация аналогичная и для симметричного измерителя все время выполняется условие БЗ.

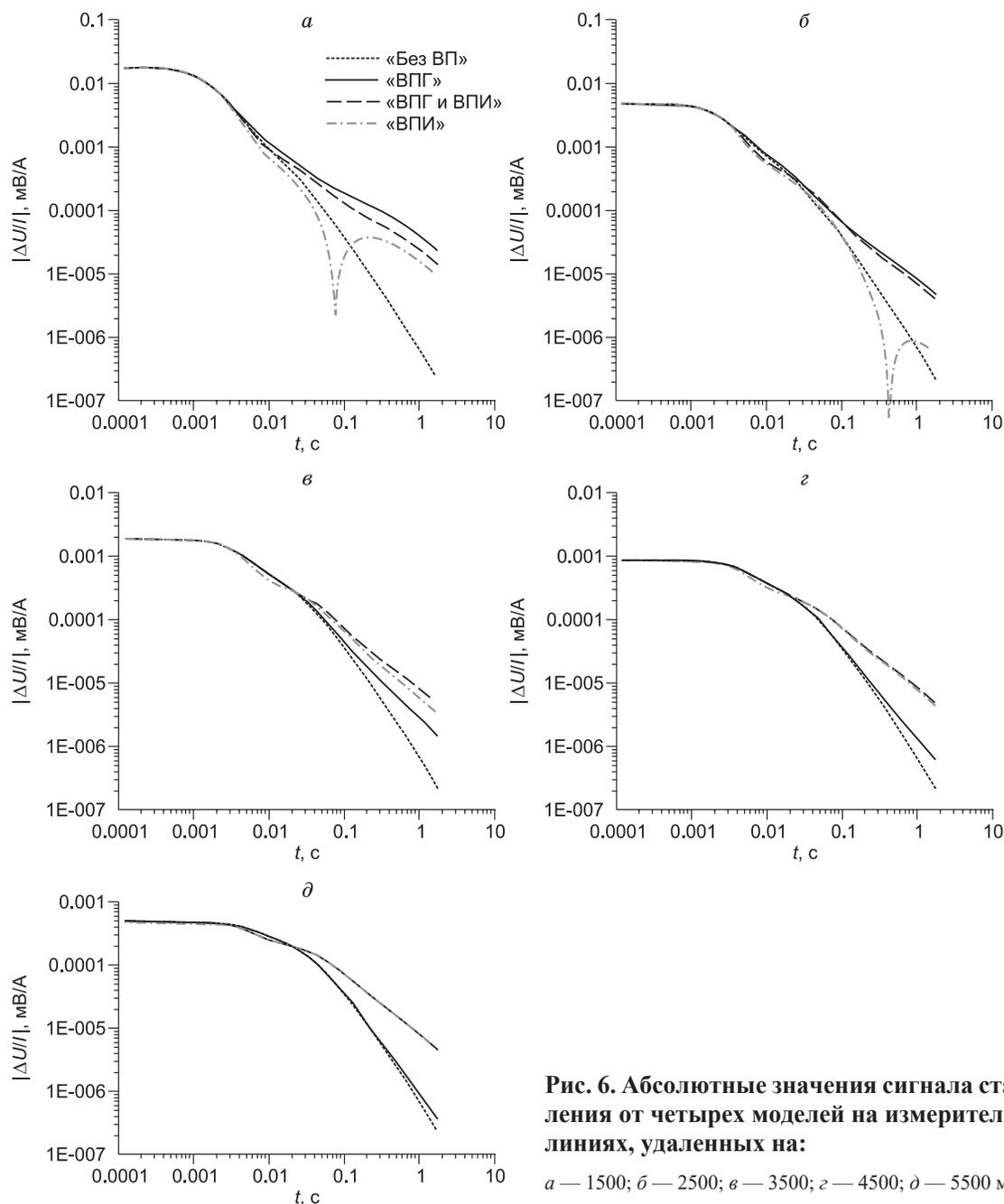


Рис. 6. Абсолютные значения сигнала становления от четырех моделей на измерительных линиях, удаленных на:

a — 1500; *б* — 2500; *в* — 3500; *г* — 4500; *д* — 5500 м.

Во время переходного процесса на симметричном измерителе для всех поляризующихся моделей присутствует смена знака сигнала. Сигнал СП имеет противоположный знак относительно возбуждающего импульса, для поляризующихся моделей он меняет знак по мере затухания индукционного процесса.

На графиках (рис. 7) для каждой трехэлектродной измерительной установки приведены абсолютные значения амплитуды сигнала переходного процесса между ее крайними электродами от четырех моделей.

Отклик от неполяризующейся модели (пунктирная линия) на поздних временах одинаков для всех линий и сигналы от других моделей удобно рассматривать относительно этой кривой.

Смена знака сигнала отмечается только от модели «ВПИ» для ближней линии (M_1M_3). При увеличении разноса отклик «ВПИ» на поздних временах положительный и по амплитуде становится больше, чем для первого разноса.

Амплитуда сигнала «ВПГ» при увеличении разноса в поздней стадии уменьшается и приближается к сигналу «Без ВП».

Сигнал «ВПГ и ВПИ» (штриховая линия) на всех разносах положительный и по мере увеличения разноса и уменьшения амплитуды сигнала от «ВПГ» в поздней стадии переходного процесса к нему стремится сигнал от «ВПИ».

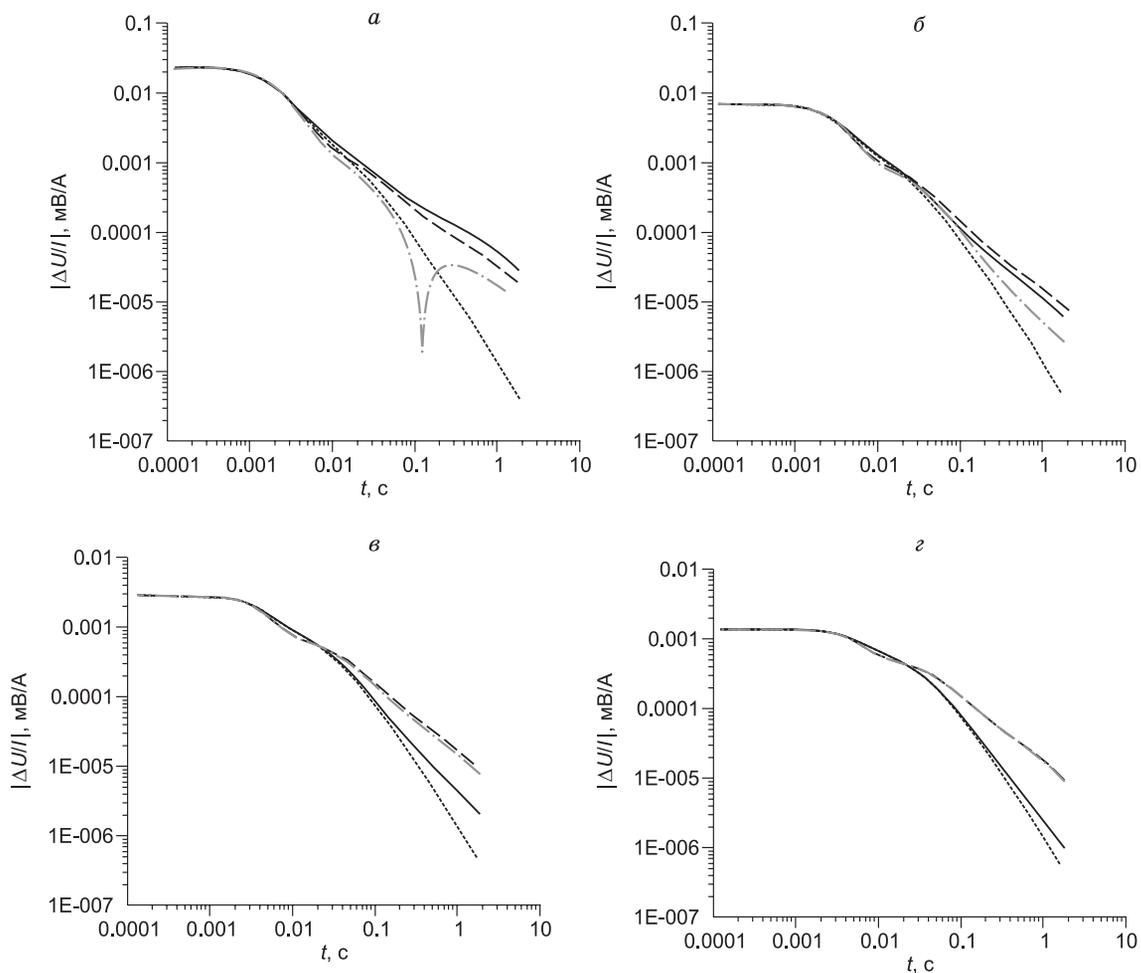


Рис. 7. Абсолютные значения сигнала становления на трехэлектродных измерительных линиях $M_1M_2M_3$ (а), $M_2M_3M_4$ (б), $M_3M_4M_5$ (в), $M_4M_5M_6$ (г).

Усл. обозн. см. на рис. 6.

Близость значений разности потенциалов на смежных линиях M_1M_2 , M_2M_3 , M_3M_4 , M_4M_5 , M_5M_6 показывает вторая конечная разность сигнала переходного процесса ($\Delta^2U(t)$) (рис. 8). На симметричной установке эта величина не формируется, так как для одномерной модели она равна нулю. Для неполяризуемой земли (пунктирная линия) на всех трехэлектродных измерительных линиях после 30-й мс этот параметр резко уменьшается и после 200-й мс его значения становятся меньше $1E^{-8}$ мВ/А (они не показаны на рис. 8).

Для модели «ВПИ» (штрихпунктирная линия) отмечается смена знака сигнала Δ^2U для линий $M_1M_2M_3$, $M_2M_3M_4$, $M_3M_4M_5$. С увеличением разноса от первой линии до третьей отрицательные значения «ВПИ» по амплитуде становятся больше значений «ВПГ».

Для модели «ВПГ и ВПИ» (штриховая линия) присутствует смена знака сигнала на линиях $M_2M_3M_4$ и $M_3M_4M_5$.

Для модели «ВПГ» (сплошная линия) смены знака сигнала на всех разносах не происходит, но момент изменения скорости спада кривых — время, когда происходит изменение их наклона относительно оси времени, увеличивается при удалении измерительной линии от источника.

Значительные изменения претерпевает сигнал Δ^2U для самой удаленной линии ($M_4M_5M_6$). На ней изменения сигнала в поздней стадии переходного процесса от моделей «ВПГ», «ВПГ и ВПИ» и «ВПИ» схожи.

На графиках (рис. 9) для каждой трехэлектродной измерительной линии в осевой области источника показана трансформанта $P1$ для четырех моделей.

Трансформанта от неполяризуемой модели (пунктирная линия) после 100-й мс выходит на 0 на всех разносах, что свидетельствует о стремлении к 0 Δ^2U .

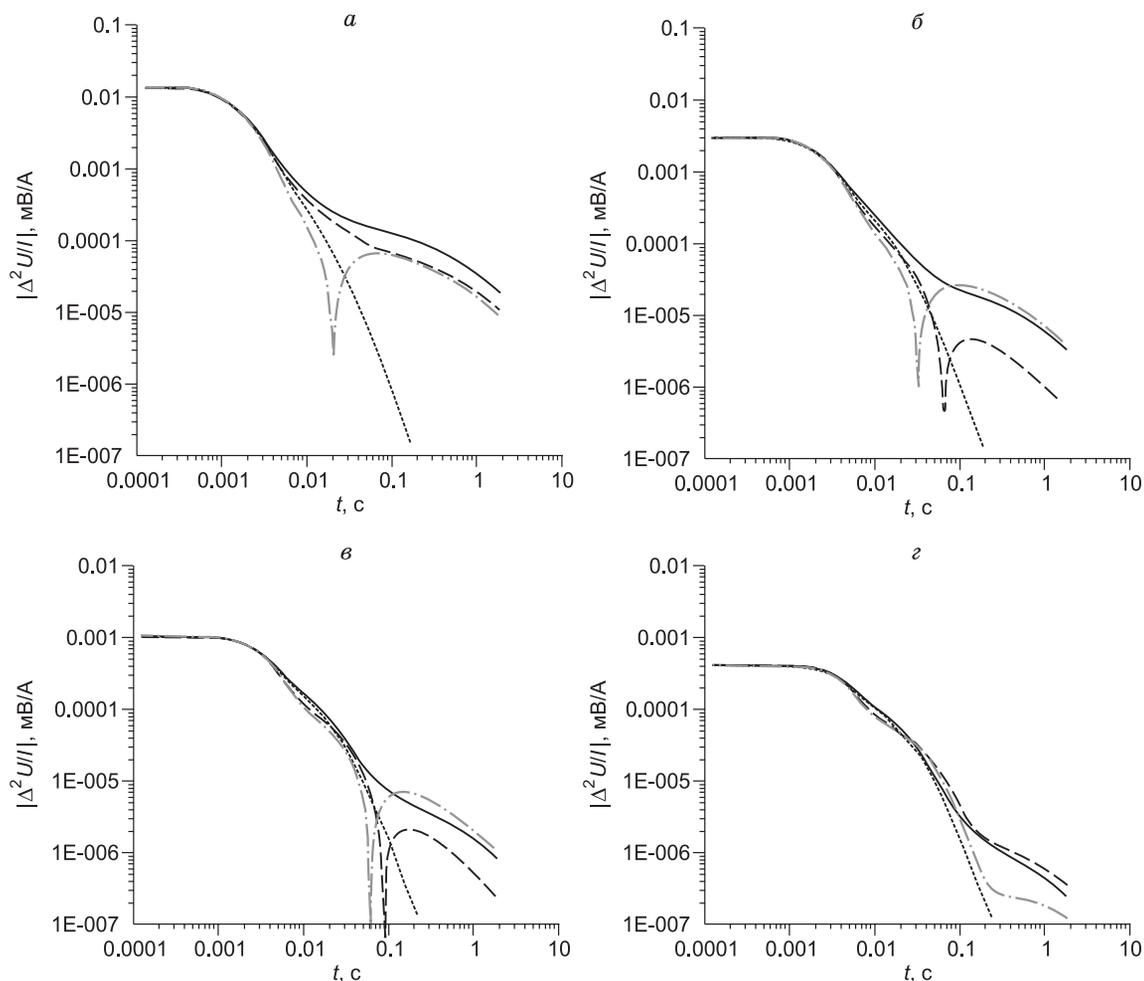


Рис. 8. Абсолютные значения переходной характеристики второй конечной разности потенциалов на трехэлектродных измерительных линиях $M_1M_2M_3$ (а), $M_2M_3M_4$ (б), $M_3M_4M_5$ (в), $M_4M_5M_6$ (г).

Усл. обозн. см. на рис. 6.

$P1$ для модели «ВПГ» (сплошные линии) после изменения скорости спада параметра Δ^2U начинает возрастать и имеет восходящую правую ветвь на всех разностях. Начало восходящей ветви также смещается на более поздние времена при увеличении разности.

Над моделью «ВПИ» (штрихпунктирная линия) после времени смены знака второй конечной разности потенциалов на трех первых линиях ($M_1M_2M_3$, $M_2M_3M_4$, $M_3M_4M_5$) можно наблюдать смену знака трансформанты $P1$, которая имеет нисходящую правую ветвь отрицательных значений.

Над моделью с совместным проявлением ВПГ и ВПИ (штриховые линии) смена знака $P1$ отмечается для второй и третьей линии.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОВЕДЕНИЯ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ НА ЗАЗЕМЛЕННЫХ ЛИНИЯХ И ТРЕХЭЛЕКТРОДНЫХ ЗАЗЕМЛЕННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ — ПРОЯВЛЕНИЕ ИНДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА, ВПГ И ВПИ

Проведенные расчеты и различные визуальные представления сигнала от моделей с разной глубиной расположения поляризующихся объектов выполнены для того, чтобы, проанализировав их, можно было понять, как сочетаются ЭМ сигналы разного происхождения в общем сигнале переходного процесса при импульсном режиме заземленной электрической линии.

Для ближней измерительной линии (M_1M_3) сигнал переходного процесса меняет знак для модели «ВПИ», а при удалении измерительной линии знак сигнала $\Delta U(t)$ не меняется — всегда положительный, также при увеличении разности увеличивается амплитуда отклика от модели «ВПИ». Для третьей линии (M_3M_5) сигнал «ВПИ» превосходит сигнал «ВПГ» и становится близок к сигналу «ВПГ и ВПИ». Такое

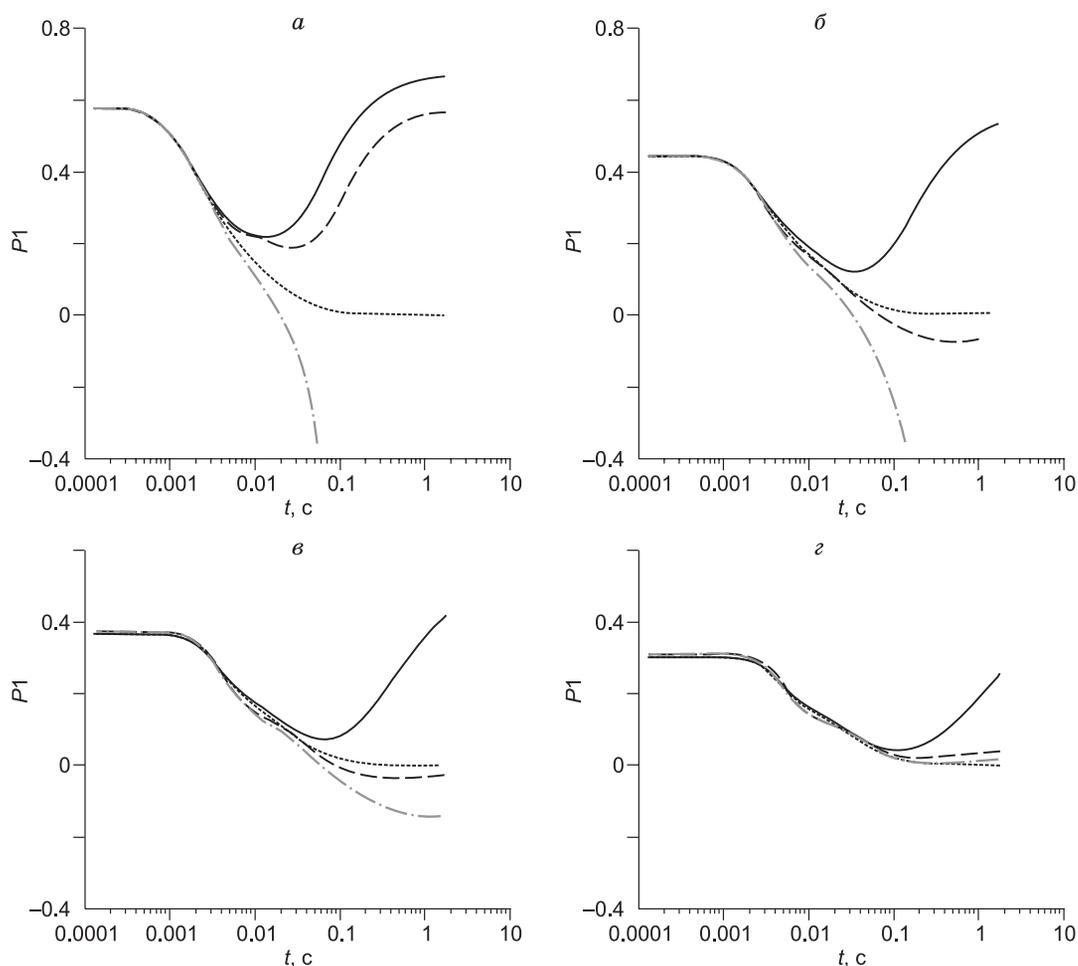


Рис. 9. Переходная характеристика трансформанты $P1$ на трехэлектродных измерительных линиях $M_1M_2M_3(a)$, $M_2M_3M_4(б)$, $M_3M_4M_5(в)$, $M_4M_5M_6(г)$.

Усл. обозн. см. на рис. 6.

поведение сигнала можно интерпретировать так, что гальванические токи, несмотря на мощный высокоомный экран, проникают через него и возбуждают подэкранныю поляризующую толщ. При увеличении разноса увеличивается доля регистрируемого сигнала, связанного с гальванически-вызванной поляризацией от подэкранный толщ, находящейся на глубине от 700 до 900 м. Эффективная глубина регистрации отклика гальванического тока, при условии $1/5$ длины разноса, для осевых измерителей $M_1—M_3$, $M_2—M_4$, $M_3—M_5$, $M_4—M_6$ составляет приблизительно 400, 600, 800 и 1000 м. Нужно еще раз отметить, что название моделей «ВПГ», «ВПИ» и «ВПГ и ВПИ» носит условный характер, и описываемое поведение сигнала это наглядно демонстрирует.

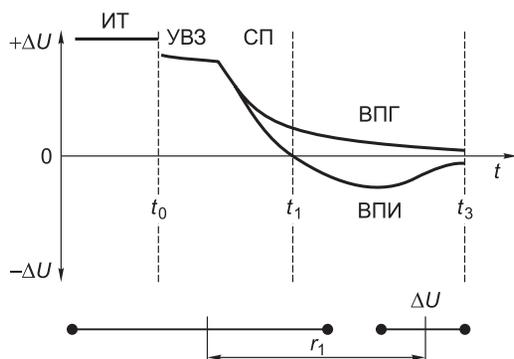


Рис. 10. Схематичное протекание переходного процесса над проводящей поляризующей средой в осевой области источника на малых разносах.

ИТ — импульс тока, УВЗ — импульсное возбуждение, распространившееся по воздуху; СП — становление поля; ВПГ — гальванически-вызванная поляризация; ВПИ — индукционно-вызванная поляризация; t_0 — время выключения тока; t_1 — время смены знака поля при проявлении ВПИ; t_3 — время окончания измерений, r_1 — разнос, близкий к размеру источника.

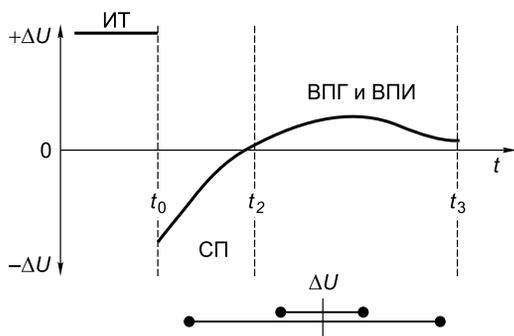


Рис. 11. Схематичное протекание переходного процесса над проводящей поляризующейся средой в экваториальной области источника для симметричной установки.

t_0 — время выключения тока; t_2 — время смены знака поля при проявлении ВП («ВПГ и ВПИ»); t_3 — время окончания измерений. Остальные усл. обозн. см на рис. 10.

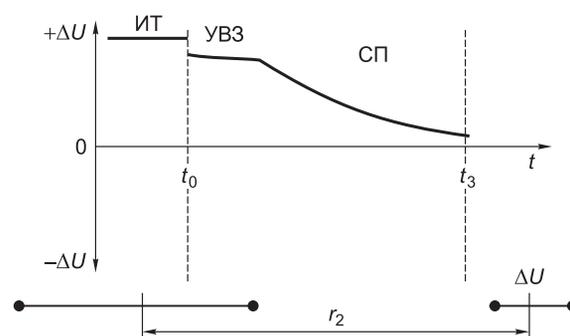


Рис. 12. Схематичное протекание переходного процесса над проводящей поляризующейся средой в осевой области источника на «больших» разнотах.

Усл. обозн. см на рис. 10. r_2 — разнос, в несколько раз превышающий размер источника.

Смену знака сигнала переходного процесса на линиях, расположенных в осевой области источника, можно связать с проявлением индукционно-вызванной поляризации (рис. 10).

После импульса тока (ИТ) на измерительных линиях в осевой области источника регистрируется сигнал переходного процесса, связанный с импульсным возбуждением, распространившимся по воздуху (УВЗ), убывающий при удалении от источника и зависящий от геометрии установки. Во время ранней стадии переходного процесса, когда появившийся вихревой ток поддерживает структуру исчезающего гальванического тока, сигнал переходного процесса на измерителях не уменьшается, это говорит о том, что плотность вихревого тока на этой стадии переходного процесса не изменяется какое-то время. После того как высокочастотное магнитное поле, удерживающее вихревой ток в соленоидальной петле, затухает [Матвеев, 1990], начинается диффузионное просачивание (растекание вглубь и вширь) в среде вихревого тока, плотность которого уменьшается, это отражается на уменьшении сигнала на измерителях во временном диапазоне СП. Как только вихревые токи затухают (их плотность становится меньше плотности токов гальванически- и индукционно-вызванной поляризации), сигнал начинает определяться токами ВПГ или ВПИ. Скорость диффузии вихревых токов (скорость протекания процесса СП) зависит от проводящих свойств геологической среды, соответственно, момент, когда токи ВП начнут определять протекание переходного процесса, также связан с этой характеристикой среды (рис. 11).

Учитывая, что при совместном проявлении ВПГ и ВПИ последняя не является преобладающей, даже при большем значении поляризуемости подэкранный толщ по сравнению с поляризуемостью надэкранный толщ, для источника заземленная линия влияние гальванически-вызванной поляризации для данной модели превалирует над влиянием индукционно-вызванной поляризации составляющей, поэтому для разности потенциалов не отмечается смены знака. Для измерений в осевой зоне источника знак поля индукции и ВП одинаков, ВПИ проявляется в смене знака сигнала переходного процесса.

Проявление ВПИ и ВП в целом на такой установке будет зависеть от постоянной времени СП, разнота и, вероятно, продолжительности времени регистрации сигнала. При большом удалении приемника от источника (рис. 12), на ограниченном временном диапазоне, ВП может вообще не проявиться.

Вид трансформанты P_1 для неполяризующейся среды, поляризующейся в верхней части и под высокоомным экраном, существенно различается — трансформанта становится информативным инструментом для выделения временного диапазона превалирования сигнала, связанного с ВПГ или ВПИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гальванически-заземленная линия в импульсном режиме пропускания тока в проводящей земле возбуждает индуктивный переходный процесс, ВПГ и ВПИ. Во время токового импульса в поляризующейся среде протекают различные процессы разделения зарядов. После прекращения этого воздействия начинаются обратные релаксационные процессы, проявляющиеся как ЭМ сигнал, регистрируемый измерителем совместно с ЭМ сигналом, связанным с диффузией вихревых токов внутри проводящей земли. Вихревые токи, распространяющиеся внутри поляризующейся среды, также индуцируют процессы

разделения зарядов, которые после их ослабления, а затем и затухания становятся обратными релаксационными процессами, так же проявляющимися, как дополнительный ЭМ сигнал, регистрируемый измерителем. Это описание последствий импульсного воздействия заземленной электрической линии на проводящую поляризующуюся землю показывает, что он сложнее, чем при таком же воздействии индуктивного источника. Сигнал, регистрируемый индуктивными приемниками над поляризующейся землей, содержит, по меньшей мере, индуктивную и поляризационную составляющую, возбуждаемую вихревым током. Сигнал, регистрируемый заземленной электрической линией, содержит индуктивную и поляризационную составляющую, возбуждаемую как гальваническим, так и вихревым током. В сигнале поляризационной составляющей возможно проявление нескольких релаксационных процессов различной природы. Несмотря на сложность регистрируемого сигнала именно заземленная линия чаще используется для изучения ВП, так как плотность гальванических токов, «заряжающих» землю, выше, чем у вихревых токов незаземленного источника, а время воздействия определяется продолжительностью токового импульса, а не продолжительностью переходного процесса, как для индуктивного источника.

Интерпретация результатов численного моделирования позволила сделать несколько интересных, с практической точки зрения, заключений. Эффективная глубина, с которой регистрируется отклик земли осевой установкой, зависит от разноса — расстояния между источником и приемником. Поэтому на близком расстоянии (на малых разносах) глубинность исследования постоянным током небольшая, и на линии, заземленной в осевой зоне источника, поляризация, вызванная вихревым током, проявляется в виде смены знака сигнала переходного процесса. При удалении приемника от источника в осевой зоне (увеличении разноса) увеличивается эффективная глубина, с которой поступает отклик постоянного тока, и на схожем временном диапазоне влияние ВПИ уменьшается.

Важный результат расчетов — зафиксировано присутствие смены знака сигнала переходного процесса для измерителя в осевой области источника в присутствии среды, для которой поляризация вызвана вихревым током. Это становится новым научным фактом, так как считалось [Моисеев, 2002], что отрицательные значения приобретает только вторая конечная разность сигнала переходного процесса. Здесь можно сделать вывод: для источника заземленная линия в осевой зоне индукционно-вызванная поляризация проявляется в смене знака сигнала $\Delta U(t)$, а для трехэлектродной измерительной установки в смене знака второй конечной разности сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$ и трансформанты $P1(t)$.

Для симметричной установки сигнал становления поля имеет противоположный знак первичному полю, а поле ВП и гальванической, и индукционной природы совпадает по знаку с первичным полем.

Нужно подчеркнуть, несмотря на то, что вызванная поляризация возбуждается вихревым или гальваническим током, природа сигнала ВПИ и ВПГ одинакова — электрофизические, электрохимические и электрокинетические релаксационные процессы в многофазной гетерогенной геологической среде.

Вызывает интерес исследование проявления ВПИ и ВПГ для условий акваторий. Здесь водная толща представляет из себя проводящий, в зависимости от минерализации воды, неполяризующийся слой, который отделяет электроразведочную установку от проводящей поляризующейся геологической среды. В зависимости от мощности воды, глубины погружения установки, разноса и времени регистрации сигнала соотношение ВПИ и ВПГ будет различаться. Нахождение оптимальной геометрии установки, параметров генерации и измерения сигнала для изучения поляризуемости геологической среды вызывает практический интерес аквальной (акваториальной) геоэлектрики.

ЛИТЕРАТУРА

Антонов Е.Ю., Шейн А.Н. Разделение эффекта становления и явления вызванной поляризации при зондировании поляризующихся сред методом переходных процессов // Сборник материалов Международного научного конгресса «Гео-Сибирь-2007», 25—27 апреля 2007 г. Новосибирск, СГГА, 2006, с. 231—218.

Аузин А.А., Зацепин С.А. О дисперсии диэлектрической проницаемости геологической среды (применительно к интерпретации материалов георадиолокации) // Вестн. ВГУ. Серия Геология, 2015, № 4, с. 122—127.

Вишняков А.Э., Лисицын Е.Д., Яневич М.Ю. Влияние временных параметров вызванной поляризации залежей углеводородов на переходные процессы электромагнитного поля // Техника и методика геофизических исследований Мирового океана, Севморгеология, 1988, с. 124—132.

Губатенко В.П. Эффект Максвелла—Вагнера в электроразведке // Физика Земли, 1991, № 4, с. 88—98.

Жданов М.С. Геофизическая электромагнитная теория и методы. М., Научный мир, 2012, 680 с.

Каменецкий Ф.М. Электромагнитные геофизические исследования МПП. М., ГЕОС, 1997, 162 с.

Каменецкий Ф.М., Тригубович Г.М., Чернышев А.В. Три лекции о вызванной поляризации геологической среды. Мюнхен, Вела Ферлаг, 2014, 58 с.

Карасев А.П., Птицын А.Б., Юдицких Е.Ю. Быстрые переходные процессы вызванной поляризации. Новосибирск, Наука, 2005, 291 с.

Кожевников Н.О. Быстропротекающая индукционно-вызванная поляризация в мерзлых породах // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (4), с. 527—540.

Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю., Захаркин А.К., Корсаков М.А. Поиск таликов методом ЗСБ в условиях интенсивного проявления индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (12), с. 1815—1827.

Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. Л., Недра, 1980, 391 с.

Компаниец С.В., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Проявление и учет индукционно-вызванной поляризации при изучении осадочного чехла юга Сибирской платформы методом ЗБС // Геофизика, 2013, № 1, с. 35—40.

Легейдо П.Ю. Теория и технология дифференциально-нормированной геоэлектроразведки для изучения поляризующихся разрезов в нефтегазовой геофизике: Автореф. дис... д. г.-м. н. Иркутск, ИрГТУ, 1998, 38 с.

Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Дифференциально-нормированный метод электроразведки при прямых поисках залежей углеводородов // Геофизика, 1995, № 4, с. 42—45.

Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Информативность дифференциальных методов электроразведки при изучении поляризующихся сред // Геофизика, 1997, № 3, с. 49—56.

Матвеев Б.К. Электроразведка. М., Недра, 1990, 368 с.

Могилатов В.С. Импульсная электроразведка. Новосибирск, НГУ, 2014, 300 с.

Моисеев В.С. Метод вызванной поляризации при поисках нефтеперспективных площадей. Новосибирск, Наука, 2002, 136 с.

Петров А.А. Возможности метода становления электрического поля при поисках углеводородов в шельфовых зонах // Геофизика, 2000, № 5, с. 21—26.

Сидоров В.А. Об электрической поляризуемости неоднородных пород // Изв. АН СССР. Физ. Земли, 1987, № 10, с. 58—64.

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.

Nabighian M.N. Quasi-static transient response of a conducting half-space — an approximate representation // Geophysics, 1979, v. 44, p. 1700—1705.

Strack K.-M. Exploration with deep transient electromagnetics. Amsterdam, Elsevier, 1992, 373 p.

*Рекомендована к печати 28 августа 2019 г.
И.Н. Ельцовым*

*Поступила в редакцию 18 сентября 2018 г.,
после доработки — 25 июля 2019 г.*