

РАЗДЕЛ 6. ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

УДК 25.00.10

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС НА ЗАЗЕМЛЁННЫХ ЛИНИЯХ НАД ПОЛЯРИЗУЮЩЕЙСЯ ЗЕМЛЁЙ

Агеев Е.В.¹, Ситников А.А.², Пестерев И.Ю.², Попков А.В.², Воднева Е.Н.¹

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация;

²ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания», г. Иркутск, Российская Федерация

E-mail: aev@dnme.ru

В публикации поднимается вопрос протекания переходного процесса в проводящей поляризуемой Земле после импульсного воздействия заземлённой линией, который сложнее, чем после аналогичного воздействия индуктивной петлёй. Заземлённая линия возбуждает среду как гальванически, так и индуктивно, соответственно в геологической среде протекание как гальванических, так и вихревых токов будет создавать релаксационные процессы, которые проявляются как ЭМ сигнал вместе с сигналом индуктивного становления поля.

Научная задача публикации исследовать переходный процесс электрического поля на поверхности проводящей поляризуемой Земли для нескольких разностей осевой установки. Использовать для этого ряд одномерных моделей в которых ВП создаётся преимущественно гальваническим током, преимущественно вихревым током и двумя типами токов и показать различие сигнала переходного процесса на 3-х электродных измерительных линиях при преобладании гальванического и индуктивного возбуждения вызванной поляризации для визуального выделения временного диапазона когда в общем сигнале переходного процесса преобладает сигнал становления, гальванически вызванной поляризации и индукционно вызванной поляризации.

Исследование основано на результатах решения прямой задачи импульсной электроразведки с заземлёнными линиями, в которой ВП учитывается введением частотно зависимого удельного электрического сопротивления формулой Коула-Коула. Построении сигналов переходного процесса ($\Delta U(t)$), второй конечной разности сигналов переходного процесса ($\Delta^2 U(t)$) и трансформанты ЭМ поля ($P1(t)$) и их визуальный анализ.

Ключевые слова: переходный процесс, индукционно вызванная поляризация, ВПИ, гальванически вызванная поляризация, ВПГ, заземлённая электрическая линия, индуктивная петля, трёх электродные измерительные линии, дифференциально-нормированный метод электроразведки, ДНМЭ.

ВВЕДЕНИЕ

Геологическая среда является гетерогенной и полифазной, воздействие на неё внешнего ЭМ поля, в том числе искусственного источника, приводит к накоплению ЭМ энергии внутри неё, которая высвобождается после прекращения этого внешнего воздействия и может быть зарегистрирована измерителями ЭМ сигнала [1]. Импульсный источник в квазистатическом приближении воздействуя на Землю создаёт в ней токи. Заземлённая линия воздействует на среду гальванически и индуктивно, образуя гальванический и вихревой ток [2]. Незаземлённая петля воздействует на Землю индуктивно, порождая в ней вихревой ток. Отклик среды на

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС НА ЗАЗЕМЛЁННЫХ ЛИНИЯХ НАД ПОЛЯРИЗУЮЩЕЙСЯ ЗЕМЛЁЙ

воздействие таких источников будет различен.

ВП для индуктивного источника и приёмника, проявляющаяся на разных диапазонах времени переходного процесса, описана и изучена для нескольких механизмов (релаксация Максвелла-Вагнера, мембранная поляризация, электролитическая поляризация) [3, 4, 5]. Для гальванического источника и приёмника описана и изучена вызванная поляризация, связанная с гальваническим током для процессов, протекающих на границе ионная среда – электролит и электронно-проводящая среда – электролит [6], но во время переходного процесса при импульсном возбуждении Земли этим источником возникает и индукционно вызванная поляризация, порождённая вихревым током. Эта составляющая ЭМ сигнала заземлённого источника изучена недостаточно и проблематика исследования направлена на её изучение. Вызывает интерес совместное проявление ЭМ индукции, индукционно и гальванически вызванной поляризации в регистрируемом заземлённой линией ЭМ сигнале, исследование ставит задачу показать характерные черты сигнала, свойственные проявлению каждого из этих процессов.

Измерение сигнала в методе ВП [6], в его широко распространённой методике, выполняется в экваториальной области заземлённой линии на её оси, как правило, симметричными установками. Проводились теоретические расчёты импульсного отклика и практические измерения для симметричной измерительной линии по изучению отклика ВП для условий акваторий [7, 8].

Для установок с измерителями в экваториальной и осевой области источника (для симметричных и осевых установок) в импульсном режиме расчёты и измерения проводил В.С. Моисеев [9].

Применяющийся на практике для решения нефтегазопроисловых задач дифференциально-нормированный метод электроразведки (ДНМЭ) использует осевые установки с трёх-электродными измерительными линиями [10, 11, 12, 13, 14]. Для сухопутных измерений используется одна измерительная линия, для измерений на акваториях – установка с несколькими измерительными линиями. Проводятся измерения переходных характеристик сигнала ($\Delta U(t)$), второй конечной разности сигнала ($\Delta^2 U(t)$) и расчёт трансформанты ЭМ поля ($P1(t)$), позволяющей ослабить влияние индукционной составляющей сигнала переходного процесса в поздней стадии.

1. ПРОЯВЛЕНИЕ ВПИ ПРИ ИНДУКТИВНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ И ПРИЁМЕ ЭМ СИГНАЛА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

ВПИ – возникает при воздействии на поляризующуюся среду вихревого тока (рис. 1а). Проявление этого релаксационного процесса в ЭМ сигнале хорошо видно при индукционном возбуждении и приёме поля становления (во временной области). В результатах измерений зондированием становлением поля ВПИ проявляется как сигнал противоположного знака в отличие от становления ЭМ поля. ВПИ может быть связана с рядом релаксационных процессов различной природы.

Быстрые процессы индукционно вызванной поляризации (БВПИ) отмечаются над мёрзлыми породами. При измерениях индуктивными установками и

импульсном возбуждении переходного процесса, отмечались немонотонные спады - вплоть до смены полярности сигнала, которые невозможно было описать диффузионным распространением ЭМ поля в проводящей среде [15]. Первоначально объяснение этому эффекту было найдено на основе макроскопически гетерогенной среды и связано с проявлением эффекта Максвелла-Вагнера в мёрзлых породах с частотно независимыми удельной электропроводностью (σ) и диэлектрической проницаемостью (ϵ) [16]. Затем было показано, что в ряде случаев, и в первую очередь, применительно к условиям криолитозоны аномальные переходные характеристики удаётся объяснить в рамках модели однородной геологической среды содержащей вещества с полярными молекулами, и теории диэлектрической релаксации Дебая [4, 15]. БВПИ проявляется на временах от первых мкс до первых мс.

Более инерционны 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 мс до сотен мс. Мембранная поляризация устанавливается от мс до с. Электролитические процессы связаны с присутствием электронно-проводящих включений внутри пористой (трещиноватой) геологической среды. Они длятся от первых мс до с. Отмечаются также быстропротекающие процессы такой природы от десятков мкс до первых мс [16].

В геофизической литературе проявление релаксационных процессов получило ряд обозначений релаксацию в мёрзлых породах для индуктивных установок называют быстропротекающей индукционно вызванной поляризацией (БВПИ) [15]. Проявление электрокинетической и электролитической релаксации – низкочастотная дисперсия (НЧД) или вызванная поляризация (ВП) [18]. Быстропротекающие процессы выделяют в быстропротекающую вызванную поляризацию (БВП) [16].

Для индукционного возбуждения и приёма неустановившегося ЭМ поля характерно возбуждение только вихревых токов, которые протекая в поляризующейся среде возбуждают только ВПИ различной природы. Но плотность вихревых токов меньше, чем гальванических и время их протекания в Земле меньше, чем гальванических, поэтому для изучения ВП такая система возбуждения и приёма применяется редко. Можно утверждать, что процессы ВПИ являются мешающими для изучения процесса становления.

Нужно отметить, что при индуктивном возбуждении и приёме ЭМ сигнала переходного процесса индукционно вызванная поляризация (ВПИ) проявляется в смене знака ЭДС.

2. ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЁТЫ ДЛЯ ОСЕВЫХ УСТАНОВОК С ЗАЗЕМЛЁННЫМИ ЛИНИЯМИ

Гальванически заземлённая линия в импульсном режиме пропускания тока в проводящей Земле возбуждает индуктивный переходный процесс, ВПГ и ВПИ [19]. Во время токового импульса в поляризующейся среде протекают процессы разделения зарядов различной природы. После прекращения этого воздействия

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС НА ЗАЗЕМЛЁННЫХ ЛИНИЯХ НАД ПОЛЯРИЗУЮЩЕЙСЯ ЗЕМЛЁЙ

начинаются обратные релаксационные процессы, проявляющиеся как ЭМ сигнал, регистрируемый измерителем совместно с ЭМ сигналом, связанным с диффузией вихревых токов внутрь проводящей Земли. Вихревые токи, распространяющиеся внутри поляризуемой среды (рис. 1б), также индуцируют процессы разделения зарядов, которые после их ослабления, а затем и затухания становятся обратными релаксационными процессами, также проявляющиеся как дополнительный ЭМ сигнал, регистрируемый измерителем. Это описание последствий импульсного воздействия заземлённой электрической линии на проводящую поляризуемую Землю показывает, что оно сложнее, чем при таком же воздействии индуктивного источника. Однако именно заземлённая линия чаще используется для изучения ВП, т.к. плотность гальванических токов, «заряжающих» Землю, выше, чем у вихревых токов незаземлённого источника, а время воздействия определяется продолжительностью токового импульса, а не продолжительностью переходного процесса, как для индуктивного источника.

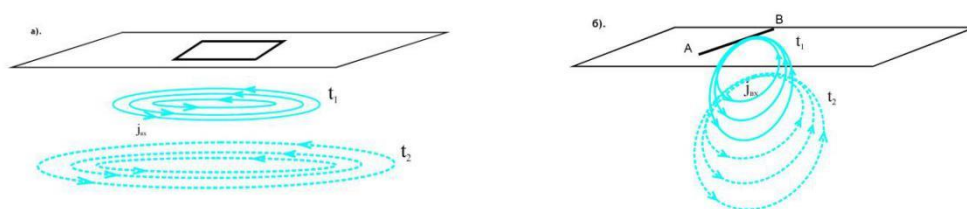


Рис. 1. Схема перемещения максимума плотности вихревых токов во время переходного процесса: а). Для источника индуктивная петля; б). Заземлённая линия.

Для наглядного представления изменения структуры вихревого тока для индуктивного и гальванического источника показано кольцо максимальной плотности вихревого тока для двух моментов времени переходного процесса (рис. 1). Кольцо вихревых токов для источника заземлённая линия растекается вглубь преимущественно в плоскости перпендикулярной поверхности земли [20], кольца вихревых токов, созданного индуктивной петлёй, диффундирует вглубь проводящей среды в плоскости параллельной земной поверхности [21].

В основе исследования лежат результаты решения прямой задачи горизонтальной электрической компоненты неустановившегося ЭМ поля для одномерной проводящей поляризуемой Земли. ВП среды учитывается частотно зависимым удельным электрическим сопротивлением (УЭС) по формуле Коула-Коула (1):

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

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

Использовался метод линейной фильтрации решения задачи ЭМ становления [8]. Первоначально получают частотную характеристику сигнала в широком

диапазоне частот, затем путём преобразования Фурье получают решение во временной области.

Расчёты проводились для осевой установки (рис. 2), состоящей из источника АВ и нескольких измерительных линий M_1M_2 , M_2M_3 , M_3M_4 , M_4M_5 , M_5M_6 . Расстояние между центром питающей и измерительных линий – 1500, 2500, 3500, 4500 и 5500 м.

Расчёты переходных характеристик проводились для интервала времени переходного процесса со 100 мкс до 2 с для конечной длины импульса – 2 с, с учётом четырёх разнополярных импульсов.

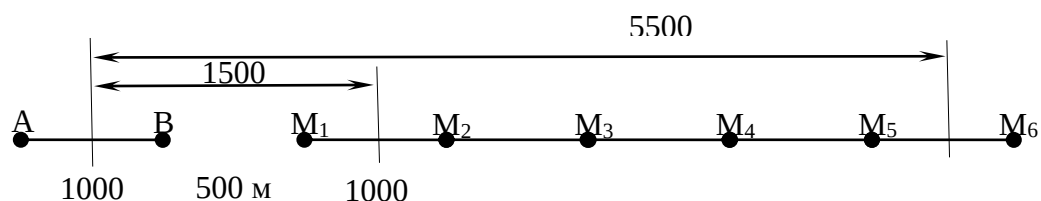


Рис. 2. Схема установки численного эксперимента. Измерительные линии в осевой (M_1M_2 , M_2M_3 , M_3M_4 , M_4M_5 , M_5M_6) и экваториальной (MN) области источника (AB).

При импульсном возбуждении, после изменения тока источника, в проводящей среде возникает вихревой ток. Для рассматриваемого источника в начале переходного процесса структура вихревого тока будет повторять структуру гальванического тока (рис. 1б). Протекание переходного процесса связано с растеканием кольца основной плотности вихревых токов вниз и вширь и стремление к равномерному распределению в Земле, что проявится в уменьшении пространственной неоднородности ЭМ поля, вызванного им.

Легейдо [12] предложил ряд геоэлектрических моделей, основанных на геологических условиях Юга Сибирской платформы (табл.), в которых ВП связано 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»). Четырёхслойный горизонтально-слоистый 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 создаётся преимущественно гальваническим током, расположенный ниже экрана проводящий поляризующейся слой, будет возбуждаться, в основном, индуктивно. Соответственно, поляризационный отклик от первого слоя будет преимущественно гальваническим, а от третьего преимущественно индукционным.

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС НА ЗАЗЕМЛЁННЫХ ЛИНИЯХ НАД ПОЛЯРИЗУЮЩЕЙСЯ ЗЕМЛЁЙ

Таблица 1.

Геоэлектрические модели численных расчётов.

Слой	ρ , Ом·м	η , %				τ , с	с, б.р.	h, м
		«Без ВП»	«ВПГ»	«ВПГ и ВПИ»	«ВПИ»			
1	50	0	2	2	0	0.5	0.5	200
2	1000	0	0	0	0			500
3	20	0	0	50	50	0.5	0.5	200
4	1000	0	0	0	0			

Рассматривая сигналы переходного процесса на осевых измерительных линиях $\Delta U(t)$ (рис. 3) относительно отклика от неполяризуемой модели (пунктирная линия на всех графиках) можно отметить, смену знака сигнала на поздних временах (начиная со 100 мс) для ближних разносов (рис. 3а и 3б) над средой с нижним поляризующимся горизонтом. Общий сигнал (модель «ВПГ и ВПИ») на поздних временах на этих разносах, вероятно, ослабляется противоположными по знаку значениями поля «ВПИ».

Для разноса 3500 м (рис. 3в) сигнал от модели «ВПГ и ВПИ» на поздних временах имеет наибольшие значения из всех откликов, это связано с тем что сигнал и от модели «ВПГ» и от модели «ВПИ» имеют одинаковый знак и усиливают общий поляризационный отклик. Причём сигнал от модели «ВПГ» в поздней стадии переходного процесса по амплитуде меньше, чем сигнал от модели «ВПИ».

При увеличении разноса (рис. 3г и 3д) переходный процесс от модели «ВПГ» слабо отличается от сигнала от неполяризуемой модели, а вот сигналы от моделей «ВПГ и ВПИ» и «ВПИ» практически совпадают.

Интерпретация протекания переходного процесса на измерительных линиях приведена ниже в соответствующем разделе.

Если объединить расчёты сигналов переходного процесса для каждой модели для всех линий M_1M_2 , M_2M_3 , M_3M_4 , M_4M_5 , M_5M_6 можно увидеть изменение вида кривых при изменении разноса (рис. 4).

Над неполяризуемой Землёй (пунктирная линия на графиках) наблюдается одинаковый монотонный спад разности потенциалов на линиях M_1M_2 , M_2M_3 , M_3M_4 , M_4M_5 , M_5M_6 (рис. 4а). Со времени примерно 30 мс разности потенциалов на всех измерительных линиях становятся практически равными – исчезает зависимость от разноса, это свидетельствует о равномерном распределении вихревых токов в Земле. Этим характеризуется поздняя стадия переходного ЭМ процесса в среде.

Над Землёй, поляризуемой в верхней части разреза (рис. 4б, сплошные линии на графиках), на линиях M_1M_2 , M_2M_3 , M_3M_4 , M_4M_5 , M_5M_6 спад становится не монотонным и различие разности потенциалов на них сохраняется на протяжении всего времени расчётов.

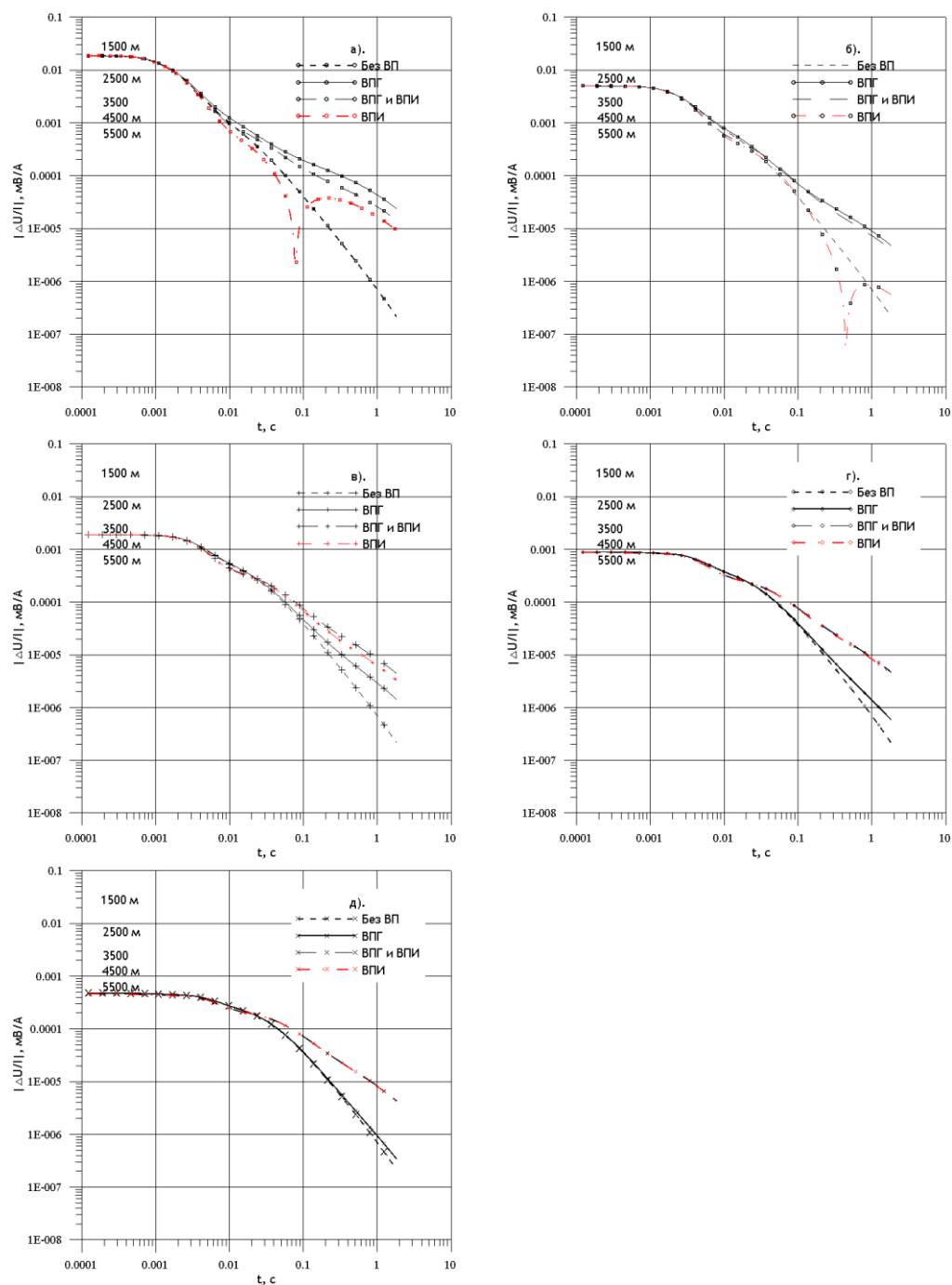


Рис. 3. Абсолютные значения сигнала переходного процесса для 4-х моделей на осевых измерительных линиях удалённых на: а). 1500; б). 2500; в). 3500; г). 4500; д). 5500 м

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС НА ЗАЗЕМЛЁННЫХ ЛИНИЯХ НАД ПОЛЯРИЗУЮЩЕЙСЯ ЗЕМЛЁЙ

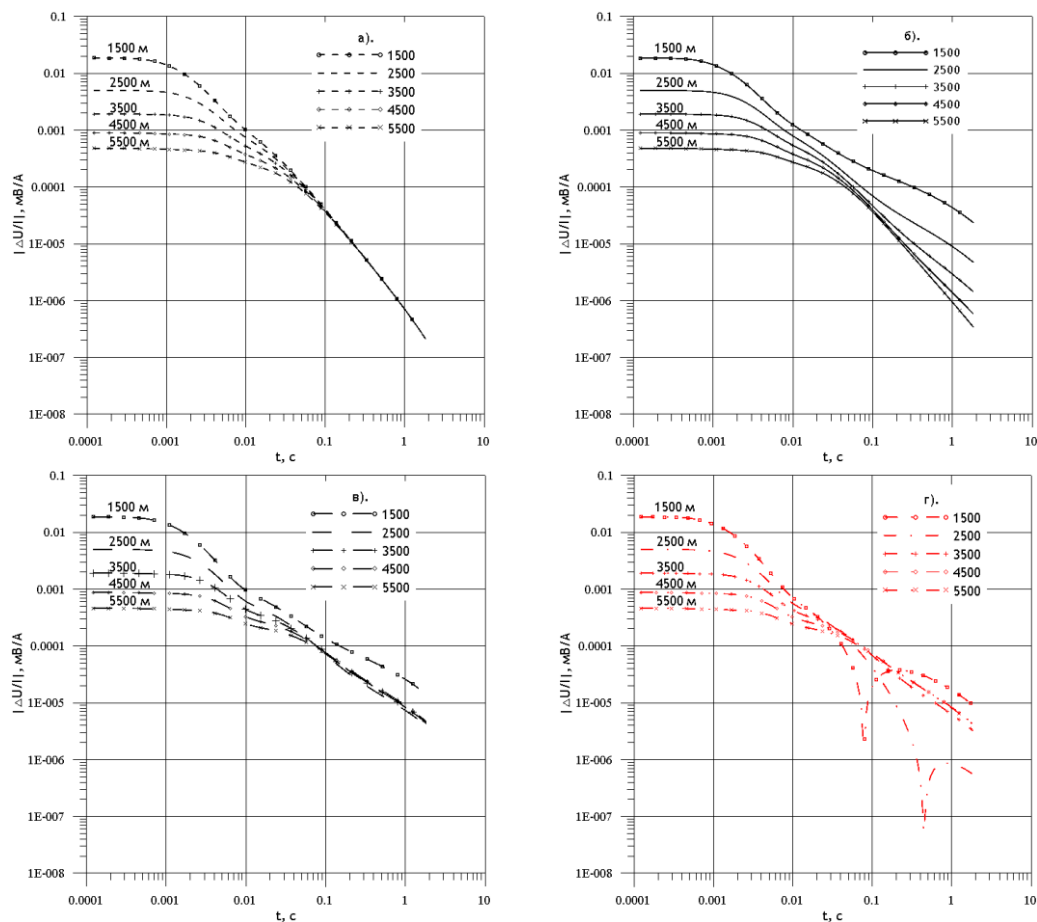


Рис. 4. Сигнал переходного процесса на измерительных линиях с разномом 1500, 2500, 3500, 4500, 5500 м: а). Над неполаризующей средой; б). Над средой, поляризуемой в верхней части разреза; в). Над поляризуемой средой; г). Над средой, поляризуемой под высокоомным экраном.

При преобладании ВПИ (рис. 4г, красные линии крупным пунктиром с точкой) переходный процесс на линиях M_1M_2 , M_2M_3 , M_3M_4 , M_4M_5 , M_5M_6 значительно отличается. Сигнал на ближних измерительных линиях (M_1M_2 и M_2M_3) после времени около 30 мс становится меньше, чем на более удалённых от источника линиях (M_3M_4 , M_4M_5 , M_5M_6), их различие с течением времени увеличивается, после времени 70 мс $\Delta U_{M_1M_2}$ и после времени 300 мс $\Delta U_{M_2M_3}$ становятся отрицательными.

Увеличение эффективной глубины зондирования постоянным током дипольной установкой приводит к увеличению в регистрируемом сигнале доли вызванной поляризации, связанной с гальваническим током. Для измерителей, более удалённых от источника, смена знака разности потенциалов не происходит. На малых расстояниях поляризационный отклик гальванически возбуждённой среды будет доходить с небольших глубин (согласно глубинности зондирования постоянным

током для дипольной установки), а поляризационный сигнал, связанный с вихревым током, будет идти с больших глубин, при увеличении разноса отклик гальванически вызванной поляризации будет регистрироваться с больших глубин, и индукционно вызванная поляризация не будет проявляться во временном диапазоне, используемом для расчётов.

Над моделью с совместным проявлением ВПГ и ВПИ (рис. 4в, линии крупным пунктиром) сигнал переходного процесса на второй измерительной линии на времени порядка 100 мс становится меньше, чем на ближней и более удалённых измерительных линиях. С течением времени различие $\Delta U_{M_2M_3}$ и ΔU на других линиях увеличивается, но смены знака разности потенциалов, до времени окончания измерений – 2 с, ни на второй, ни на других измерителях не отмечается.

Присутствие смены знака сигнала переходного процесса отмечается на поздних временах переходного процесса над моделью с поляризуемостью только в нижнем горизонте для двух ближних разносов. Далее при увеличении разноса сигнал от такой модели становится монотонным и меняется слабо.

3. ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ (ΔU), ВТОРОЙ КОНЕЧНОЙ РАЗНОСТИ ($\Delta^2 U$) И ТРАНСФОРМАНТЫ $P1$ НА 3-Х ЭЛЕКТРОДНЫХ ЗАЗЕМЛЁННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ

Из нескольких смежных осевых установок возможно сформировать ряд трёх-электродных измерительных линий ($M_1M_2M_3$, $M_2M_3M_4$, $M_3M_4M_5$, $M_4M_5M_6$), на которых рассчитывается сигнал переходного процесса между электродами M_1 - M_3 , M_2 - M_4 , M_3 - M_5 , M_4 - M_6 , вторая конечная разность сигнала на трёх электродах и трансформанта ЭМ поля, позволяющая подавить вклад индукционной составляющей переходного процесса в его поздней стадии и усилить вклад гальванически вызванной поляризационной составляющей. На основе расчётной разности потенциалов между электродами M_1 - M_2 , M_2 - M_3 , M_3 - M_4 , M_4 - M_5 , M_5 - M_6 во время переходного процесса можно сформировать сигнал ΔU между крайними электродами каждой трёх-электродной измерительной линии, например, для линии $M_1M_2M_3$ (2), и вторую конечную разность сигнала $\Delta^2 U$ (3). Затем рассчитать трансформанту, названную $P1$, как отношение $\Delta^2 U$ к ΔU (4) [10, 11, 12].

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

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

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

Индукционная составляющая в поздней стадии переходного процесса не зависит от разноса (рис. 4а), поэтому её вторая конечная разность будет уменьшаться и стремиться к нулю. Для поляризационной составляющей связанной с гальваническим током неоднородность сигнала переходного процесса в зависимости от разноса сохраняется на протяжении всего времени расчётов (рис. 4б), поэтому

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС НА ЗАЗЕМЛЁННЫХ ЛИНИЯХ НАД ПОЛЯРИЗУЮЩЕЙСЯ ЗЕМЛЁЙ

вторая конечная разность будет отличной от нуля. Таким образом вторая конечная разность сигнала переходного процесса на трёх-электродной измерительной линии в поздней стадии становления будет определяться составляющей гальванически вызванной поляризации.

Отношение $\Delta^2 U$ к ΔU позволяет получить трансформанту, которая, для монотонных переходных процессов, будет изменяться в пределах от 1 до 0, в то время как сигналы переходного процесса и его второй конечной разности изменяются на несколько порядков. Также в изменении трансформанты во время переходного процесса отражается временной диапазон преобладания индукционной составляющей в общем сигнале переходного процесса в виде асимптоты в ранней стадии переходного процесса и нисходящей ветви, связанной с индукционным становлением поля в среде, затем после минимума, восходящая ветвь и асимптота на поздних временах, связанные с преобладанием составляющей связанной с гальванически вызванной поляризацией.

Теперь для всех моделей покажем на графиках расчёты разности потенциалов (рис. 5) для линий M_1M_3 , M_2M_4 , M_3M_5 , M_4M_6 , второй конечной разности для 3-х электродных установок (рис. 6) и трансформанты $P1$ (рис. 7).

4. ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЁТОВ СИГНАЛА НАД ПОЛЯРИЗУЮЩЕЙСЯ ЗЕМЛЁЙ ДЛЯ 3-Х ЭЛЕКТРОДНЫХ ЗАЗЕМЛЁННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

На графиках (рис. 5) для каждой 3-х электродной измерительной установки приведены абсолютные значения амплитуды разности потенциалов между её крайними электродами от четырёх моделей.

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

Смена знака сигнала отмечается только от модели «ВПИ» для ближней линии (M_1 - M_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» (широкий пунктир) 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».

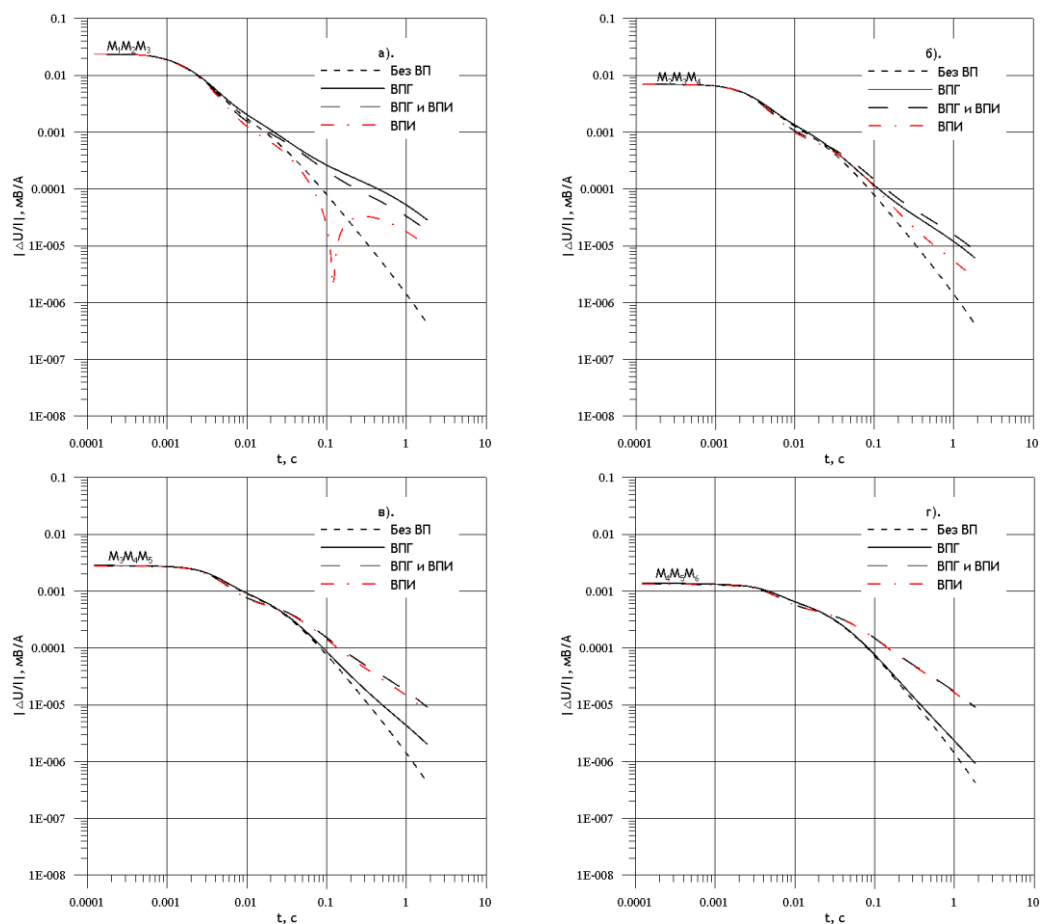


Рис. 5. Сигнал переходного процесса на 3-х электродных измерительных линиях $M_1M_2M_3$, $M_2M_3M_4$, $M_3M_4M_5$, $M_4M_5M_6$.

Близость значений разности потенциалов на смежных линиях M_1M_2 , M_2M_3 , M_3M_4 , M_4M_5 , M_5M_6 показывает сигнал переходного процесса второй конечной разности ($\Delta^2 U$) (рис. 6). Для неполяризующейся Земли (пунктирная линия) на всех 3-х электродных измерительных линиях после 30мс этот параметр резко уменьшается и после 200мс его значения становятся меньше $1e-8$ мВ/А (они не показаны на рис. 6).

Для модели «ВПИ» (широкий пунктир с точкой) отмечается смена знака сигнала $\Delta^2 U$ для линий $M_1M_2M_3$, $M_2M_3M_4$, $M_3M_4M_5$. С увеличением разности от первой линии до третьей отрицательные значения «ВПИ» по амплитуде становятся больше значений «ВПГ».

Для модели «ВПГ и ВПИ» (широкий пунктир) 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 разностях не происходит, в время смены скорости спада увеличивается при удалении

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС НА ЗАЗЕМЛЁННЫХ ЛИНИЯХ НАД ПОЛЯРИЗУЮЩЕЙСЯ ЗЕМЛЁЙ

измерительной линии от источника.

Значительные изменения претерпевает сигнал $\Delta^2 U$ для самой удалённой линии ($M_4M_5M_6$). На ней изменение сигнал в поздней стадии переходного процесса от моделей «ВПГ», «ВПГ и ВПИ» и «ВПИ» - схожи.

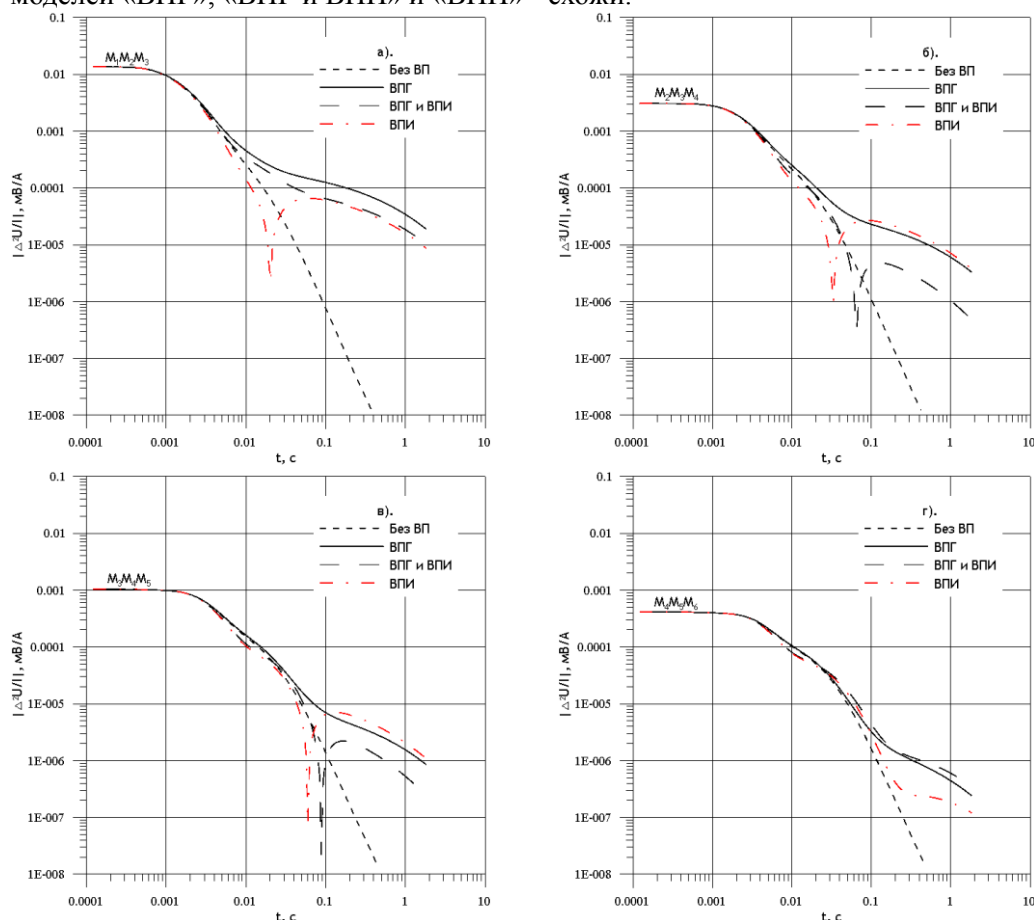


Рис. 6. Сигнал переходного процесса второй конечной разности на 3-х электродных измерительных линиях $M_1M_2M_3$, $M_2M_3M_4$, $M_3M_4M_5$, $M_4M_5M_6$.

На графиках (рис. 7) для каждой 3-х электродной измерительной линии показана трансформанта PI для четырёх моделей. Поведение трансформанты зависит от изменений $\Delta^2 U$ и ΔU во время переходного процесса. Знак трансформанты определяется знаком двух составляющих. Её отрицательные значения связаны с отрицательными значениями одной из них, для данной модели, на более ранних временах знак меняет вторая конечная разность. На ближнем разноме смена знака сигнала наблюдается и для ΔU . На трансформанте этот момент отмечается отсутствием монотонности графика, точкой разрыва и скачкообразным переходом из отрицательных в положительные значения (этот момент не показан на рис. 6а).

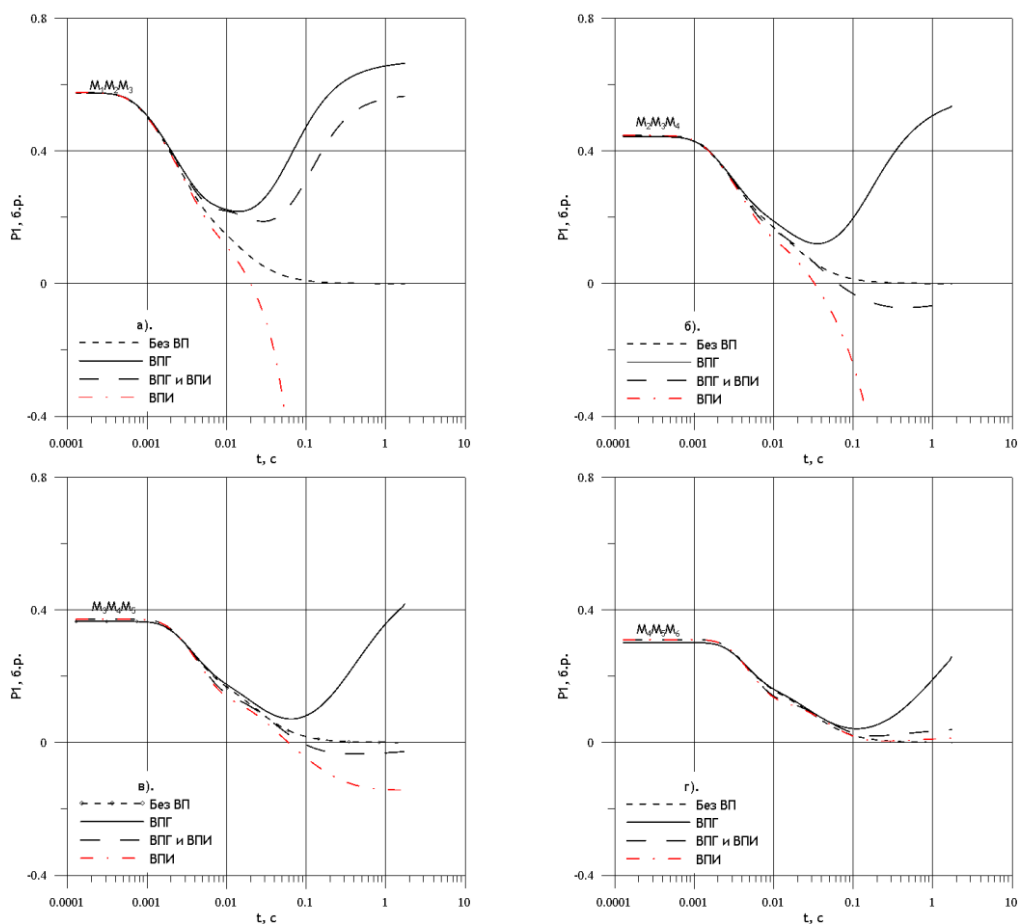


Рис. 7. Трансформанта $P1$ на 3-х электродных измерительных линиях $M_1M_2M_3$, $M_2M_3M_4$, $M_3M_4M_5$, $M_4M_5M_6$.

Отклик $P1$ от неполяризующейся модели (пунктирная линия) после 100 мс выходит на 0 на всех разностях, что свидетельствует о стремлении к 0 $\Delta^2 U$.

$P1$ для модели «ВПГ» (сплошные линии) после изменения скорости спада параметра $\Delta^2 U$ 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» (линии широким пунктиром с точкой) после времени смены знака переходный процесс второй конечной разности на трёх 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, поляризующейся в верхней и нижней части (линии крупным пунктиром) смена знака $P1$ отмечается для второй и третьей линий. Отмечается снижение амплитуды значений трансформанты такой модели на поздних временах для всех разностей, за исключением первого. Такое ослабление трансформанты

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС НА ЗАЗЕМЛЁННЫХ ЛИНИЯХ НАД ПОЛЯРИЗУЮЩЕЙСЯ ЗЕМЛЁЙ

похоже на взаимное подавление поляризационного сигнала от верхнего и нижнего поляризующегося слоя.

5. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОВЕДЕНИЯ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ НА ЗАЗЕМЛЁННЫХ ЛИНИЯХ И 3-Х ЭЛЕКТРОДНЫХ ЗАЗЕМЛЁННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ - ПРОЯВЛЕНИЕ ИНДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА, ВПГ И ВПИ

Результаты расчётов сигнала переходного процесса можно интерпретировать следующим образом: 1). отклик ВП отмечается в сигнале переходного процесса на всех разнотах для которых проводились расчёты (1500–5500 м); 2). среда поляризуется и гальваническим и вихревым током. На меньших разнотах, в пределах диапазона времён переходного процесса для которых проводились расчёты, сигнал от нижнего поляризующегося горизонта связан с поляризацией вихревым током, при увеличении разнота регистрируется поляризационный отклик от этого горизонта, связанный с гальваническим током; 3). поляризационный отклик от верхней части среды связан с гальваническим током на всех разнотах. На меньших разнотах он значительный, а с увеличением разнота, когда эффективная глубина регистрации отклика от воздействия постоянного тока для осевой установки увеличивается, он становится всё меньше и меньше. Вклад верхней части среды в отклик, связанный с гальваническим током, с увеличением разнота осевой установки уменьшается, соответственно увеличивается от нижней части среды, где расположен третий поляризующийся слой; 4). ВП, связанная с вихревым током, для заданных проводящих и поляризационных свойствах среды, проявляется на меньших разнотах, при увеличении разнота сигнал индукционно вызванной поляризации от нижней части среды перекрывается поляризационным откликом вызванным гальваническим током; 5). на симметричном измерителе для такой установки для всех поляризующихся моделей отмечается смена знака сигнала переходного процесса.

Сигнал, регистрируемый заземлённой электрической линией, содержит, по меньшей мере, индуктивную и поляризационную составляющую, возбуждаемую как гальваническим, так и вихревым током.

Важный результат расчётов – зафиксировано присутствие смены знака сигнала становления для измерителя в осевой области источника в присутствии среды для которой поляризация вызвана преимущественно вихревым током.

Эффективная глубина с которой регистрируется отклик Земли осевой установкой зависит от разнота – расстояния между источником и приёмником. На малых разнотах – глубинность исследования постоянным током небольшая и нижний поляризующийся горизонт поляризуется преимущественно вихревым током, что проявляется в виде смены знака сигнала переходного процесса на ближней линии. При увеличении разнота возрастает эффективная глубина, которая определяет сигнал постоянного тока и на схожем временном диапазоне влияние ВПИ уменьшается, третий слой поляризуется преимущественно гальваническим током, что показывает близость сигналов от моделей «ВПГ и ВПИ» и «ВПИ».

Для 3-х электродных измерительных линий поведение сигнала переходного

процесса, второй конечной разности и трансформанты PI можно интерпретировать как проявление становления поля, гальванически и индукционно вызванной поляризации. На поздних временах эти величины определяются соотношением проявления одного или другого вида вызванной поляризации.

Смена знака сигнала на поздних временах зафиксирована для сигнала переходного процесса, для второй конечной разности и для трансформанты PI на измерителях в осевой области источника на ряде разносов. Такое поведение сигналов связано с проявлением индукционно вызванной поляризации. Вид трансформанты PI для неполяризующейся среды, поляризующейся в верхней части и поляризующейся под высокоомным экраном существенно различается – трансформанту можно рассматривать как инструмент для разделения времён преобладания сигнала связанного с гальванически вызванной поляризацией и индукционно вызванной поляризацией во время переходного процесса.

ВЫВОДЫ

Сигнал, регистрируемый заземлённой электрической линией, содержит индуктивную и поляризационную составляющую, вторая возбуждается и гальваническим и вихревым током. Эффективная глубина, которая определяет отклик на воздействие постоянного тока осевой установкой, зависит от разноса – расстояния между источником и приёмником. На близком расстоянии (на малых разносах) – эффективная глубина исследования постоянным током, с которым связана гальванически вызванная поляризация, небольшая и проявляется поляризация вызванная вихревым током, в виде смены знака сигнала переходного процесса на измерительной линии. При удалении приёмника от источника в осевой зоне (увеличении разноса) увеличивается эффективная глубина влияния постоянного тока и на схожем временном диапазоне влияние ВПИ уменьшается.

Важный результат расчётов – зафиксировано присутствие смены знака разности потенциалов для измерителя в осевой области источника в присутствии среды для которой поляризация вызвана вихревым током. Это становится новым научным фактом, т.к. считалось [9], что отрицательные значения приобретает только вторая конечная разность сигнала переходного процесса. Здесь можно сделать вывод: для источника заземлённая линия в осевой зоне индукционно вызванная поляризация проявляется в смене знака сигнала переходного процесса $\Delta U(t)$, а для 3-х электродной измерительной установки в смене знака второй конечной разности $\Delta^2 U(t)$ и трансформанты $PI(t)$. Нужно отметить, что несмотря на различный вид проявления на измерителях, природа сигналов индукционно вызванной поляризации и гальванически вызванной поляризации 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

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС НА ЗАЗЕМЛЁННЫХ ЛИНИЯХ НАД ПОЛЯРИЗУЮЩЕЙСЯ ЗЕМЛЁЙ

времени регистрации сигнала соотношение ВПИ и ВПГ будет различаться. Изучение оптимальных условий для изучения поляризуемости геологической среды вызывает интерес практической акавальной геоэлектрики.

Список литературы

1. Каменецкий Ф.М., Тригубович Г.М., Чернышёв А.В. Три лекции о вызванной поляризации геологической среды. Мюнхен: Вела Ферлаг, 2014. 58 с.
2. Могилатов В.С. Импульсная электроразведка. Новосибирск: НГУ, 2014. 300 с.
3. Компаниец С.В., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Проявление и учёт индукционно-вызванной поляризации при изучении осадочного чехла юга сибирской платформы методом ЗСБ // Геофизика. 2013. №1. С. 35-40.
4. 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.
5. 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.
6. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. Л. : Недра, 1980. 391 с.
7. 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: Сборник научных трудов 1988, С. 124-132.
8. Петров А.А. Возможности метода становления электрического поля при поисках углеводородов в шельфовых зонах // Геофизика. 2000. №5. С. 21-26.
9. Моисеев В.С. Метод вызванной поляризации при поисках нефтеперспективных площадей. Новосибирск : Наука, 2002. 135 с.
10. Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Дифференциально-нормированный метод электроразведки при прямых поисках залежей углеводородов // Геофизика. 1995. № 4. С. 42–45.
11. Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Информативность дифференциальных методов электроразведки при изучении поляризующихся сред // Геофизика. 1997. №3. С. 49–56.
12. Легейдо П.Ю. Теория и технология дифференциально-нормированной геоэлектроразведки для изучения поляризующихся разрезов в нефтегазовой геофизике. Дис. на соиск. уч. ст. д. г.-м. н. Иркутск : ИрГТУ, 1998. 198 с.
13. Ситников А.А. и др. Аппаратура и системы наблюдений для решения нефтегазопроисковых задач дифференциально-нормированным методом электроразведки (ДНМЭ) на суше // Приборы и системы разведочной геофизики. 2017. №2. С. 36–41.
14. Ситников А.А. и др. Аппаратура, устройства и системы наблюдений для решения нефтегазопроисковых и инженерно-геологических задач дифференциально-нормированным методом электроразведки (ДНМЭ) на акваториях // Приборы и системы разведочной геофизики. 2017. №2. С. 42–49.
15. Кожевников Н.О. Быстропротекающая индукционно-вызванная поляризация в мёрзлых породах // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 4. С. 527–540.
16. Сидоров В.А. Об электрической поляризуемости неоднородных пород. // Изв. АН СССР. Физ. Земли. 1987. №10. С. 58-64.
17. Карасёв А.П., Птицын А.Б., Юдицких Е.Ю. Быстрые переходные процессы вызванной поляризации. Новосибирск: Наука, 2005. 291 с.
18. Каменецкий Ф.М. Электромагнитные геофизические исследования МПП. М.: ГЕОС, 1997. 162 с.
19. Агеенков Е.В., Ситников А.А., Пестерев И.Ю. Проявление разных типов вызванной поляризации в электромагнитных измерениях заземлённой линией // Геофизика. 2018. №2. С. 37–43.
20. Strack K.-M. Exploration with deep transient electromagnetics. – Elsevier science publishing Co, 1992. 373 p.
21. Nabighian M.N. Quasi-static transient response of a conducting half-space: An approximate representation // Geophysics. – 1979. – 44. – P. 1700–1705.

**TRANSIENT PROCESS ON THE SURFACE OF CONDUCTIVE
POLARIZABLE EARTH ON GROUNDED ELECTRICAL LINES**

Ageenkov E.V.¹, Sitnikov A.A.², Pesterev I.Yu.², Popkov A.V.², Vodneva E.N.¹

¹*National Research Irkutsk State Technical University, Irkutsk, Russia;* ²*Siberian Geophysical Research Production Company Ltd, Irkutsk, Russia*

E-mail: aev@dnme.ru

The publication raises the question of the transient process in a conducting polarizable Earth after a pulsing by a grounded line, which is more complicated than after a similar action by an inductive loop. A grounded line excites the medium both galvanically and inductively, respectively, in a geological environment, the flow of both galvanic and eddy currents will create relaxation processes that will manifest itself as an EM signal together with a signal of inductive field formation.

The scientific goal of the publication is to investigate the transient process of an electric field on the surface of a conducting polarizable Earth for several spans of a axial installation. Use for this purpose a number of one-dimensional models in which the IP is created primarily by galvanic current, mainly by the eddy current and by two types of currents and to show the difference in the signal of the transient process on 3 electrode measuring lines, with galvanic and inductive excitation of the induced polarization predominating for visual allocation of the time range when in general the signal of the transient process is dominated by the formation signal, galvanically induced polarization, and induction-induced polarization.

The study is based on the results of solving a direct problem of pulsed electrical reconnaissance with earthed lines, in which the IP is taken into account by introducing the frequency-dependent resistivity by the Cole-Cole formula. The dependence of the potential difference (ΔU), the second finite potential difference ($\Delta^2 U$) and the EM field transformers ($P1$) on the time (t) of the transient process and their visual analysis.

Keywords: transient process, induction induced polarization, IPI, galvanically induced polarization, IPG, grounded electric line, inductive loop, three electrode measuring lines, differential-normalized electrical prospecting method, DNME.

References

1. Kamenetsky F.M., Trigubovich G.M., Chernyshev A.V. Chto glavnoe v geofizike: geo ili fizika? [What is important in geophysics: geo or physics?]. Geophysics, 2015, no 2, pp. 69-76 (In Russian).
2. Mogilatov V.S. Impulsnaya electrorazvedka [Impuls electroprospecting]. Novosibirsk: NGU, 2014, 300 p. (In Russian).
3. Kompaniets S.V., Kozhevnikov N.O., Antonov E.Y. [Occurrence and accounting of inductive IP in the study of sedimentary cover of South of Siberian platform by TEM method]. Geophysics, 2013, no 1, pp. 35-40 (In Russian).
4. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Y., Zaharkin A.K., Korsakov M.A. Poisk talikov metodom ZSB v usloviyah intensivnogo proyavleniya induktsionno-vizvannoy polyarizatsii [TEM surveys for search for taliks in areas of strong fast-decaying IP effects]. Geologi and Geophysics, 2014, Vol. 55, no 12, pp. 1815-1827 (In Russian).
5. Hallbauer-Zadorozhnaya V.Yu. Processy proiskhodyashie v gornikh porodakh pri nalozhenii elektricheskogo toka I raznosty potencialov: vizvannaya polyarizatsiya [The processes taking place in rocks

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС НА ЗАЗЕМЛЁННЫХ ЛИНИЯХ НАД ПОЛЯРИЗУЮЩЕЙСЯ ЗЕМЛЁЙ

- when in electric current and potential difference: induce polarization]. Questions of natural science, 2016, 3(11), pp. 76–79 (In Russian).
6. Komarov V.A. Electrorazvedka metodom vyzvannoy polarizatsii [Goelectrics of induced polarization method]. L.: Nedra, 1980, 391 p. (In Russian).
 7. Vishnyakov A.E., Lisizin E.D., Yanevich M.Yu. Vliyaniye vremennikh parametrov vyzvannoy polarizatsii zalezhey uglevodorodov na perekhodnie processy elektromagnitnogo polya [The influence of IP time parameters of hydrocarbon deposits on the transient processes of the electromagnetic field]. Technique and methodology of geophysical research of the World Ocean. Sbornik nauchnikh trudov, 1988, pp. 124–132 (In Russian).
 8. Petrov A.A. Vozmozhnosti metoda stanovleniya elektricheskogo polya pry poiskakh uglevodorodov v shelfovikh zonakh [The possibilities of the TEM in the search for hydrocarbons in the shelf zones]. Geophysics, 2000, no 5, pp. 21–26 (In Russian).
 9. Moiseev V.S. Metod vyzvannoy polarizatsii pri poiskakh nefteperspektivnykh ploshadey [IP method for HC research]. Novosibirsk: Nauka, 2002, 135 p. (In Russian).
 10. Legeydo P.Yu., Mandelbaum M.M., Pikhlinitskiy N.I. Differentsialno-normirovannyi metod electrorazvedki pry pryamikh poiskakh zalezhey uglevodorodov [Differensial-normalayzed method of electroprospecting for HC research], Geophysics, 1995, no 4, pp. 42–45 (In Russian).
 11. Legeydo P.Yu., Mandelbaum M.M., Pikhlinitskiy N.I. Informativnost differentsialnykh metodov electrorazvedki pry izuchenii polarizuyushikhsya sred [Informativity of differential methods of electroprospecting for polarizable medium research]. Geophysics, 1997, no 3, pp. 49–56 (In Russian).
 12. Legeydo P.Yu. Teoriya i tekhnologiya differentsialno-normirovannoy goelectedriky dlya izucheniya polarizuyushikhsya razrezov v neftegazovoy geofizike [Theory and thecnology differensial-normalayzed goelectedricalprospecting for polarizable ground in oil&gas geophysics research]. Thesis ph. d. Irkutsk: IrGTU, 1998, 198 p. (In Russian).
 13. Sitnikov A.A. et. al. Apparatura i sistemy nabludenii dlya resheniya neftegazopoiskovykh zadach differentsialno-normirovannim metodom electrorazvedki (DNME) na sushe [Equipment and observing systems for solving of oil and gas exploration problems onshore using differentially-normalized method of electrical survey (DNME)]. Equipment and system in exploration geophysics, 2017, no 2, pp. 36–41 (In Russian).
 14. Sitnikov A.A. et. al. Apparatura, ustoystva i sistemy nabludenii dlya resheniya neftegazopoiskovykh i inzhenerno-geologicheskikh zadach differentsialno-normirovannim metodom electrorazvedki (DNME) na akvatoriyyakh [Equipment, devices and observing systems for solving of oil and gas exploration and geotechnical problems in water areas using DNME and CDEMS electrical prospecting methods]. Equipment and system in exploration geophysics, 2017, no 2, pp. 42–49 (In Russian).
 15. Kozhevnikov N.O. Bistroprotekayushey induktsionno-vyzvannoy poliarizatsiya v merzlykh porodah [Fast-decaying inductive IP in frozen ground]. Geologi and Geophysics, 2012, Vol. 53, no 4, pp. 527–540 (In Russian).
 16. Sidorov V.A. Ob elektricheskoy poliarizuemosti neodnorodnykh porod [About electrical charginability of inhomogeneous rocks]. Izv. AN USSR. Earth Physics, 1987, no 10, pp. 58–64 (In Russian).
 17. Karasev A.P., Ptichin A.B., Yudichskiy E.Yu. Bistrie perekhodnie processy vyzvannoy poliarizatsii [Fast decays of induce polarization]. Novosibirsk: Nauka, 2005, 291 p. (In Russian).
 18. Kamenetsky F.M. Elektromagnitnye geofizicheskie issledovaniya MPP [Electromagnetic geophysical surveys TEM]. M.: GEOS, 1997, 162 p. (In Russian).
 19. Ageenkov E.V., Sitnikov A.A., Pesterev I.Yu. Proyavleniye raznykh tipov vyzvannoy polarizatsii v elektromagnitnykh izmereniyakh zazemlennoy liniy [Display of induce polari-zation different types in electromagnetic measurements by the line]. Geophysics, 2018, no 2, pp. 37–43 (In Russian).
 20. Strack K.-M. Exploration with deep transient electromagnetics. Elsevier science publishing Co, 1992, 373 p.
 21. Nabighian M.N. Quasi-static transient response of a conducting half-space: An approximate representation. Geophysics, 1979, no 44, pp. 1700–1705.

Поступила в редакцию 05.05.2019