

РАЗДЕЛ 6. ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

УДК 25.00.10

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС НА ЗАЗЕМЛЁННЫХ ЛИНИЯХ, ПОМЕЩЁННЫХ В ВОДНЫЙ СЛОЙ НАД ПОЛЯРИЗУЮЩЕЙСЯ ЗЕМЛЁЙ

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

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

²*ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания», г. Иркутск, Российская Федерация
E-mail: aev@dnme.ru*

Научная задача публикации исследовать переходный процесс электрического поля в водной толще, перекрывающей проводящую поляризующуюся Землю, для осевой области источника - электрическая линия на ряде последовательно расположенных измерительных линий. Использовать для этого несколько одномерных моделей в которых вызванная поляризация (ВП) возникает в геологических образованиях и не создаётся в водном слое. Показать отличие проявления ЭМ сигнала, связанного с поляризацией, вызванной гальваническим (ВПП) и вихревым током (ВПИ) в измерениях сигнала переходного процесса на 3-х электродных измерительных линиях при различной глубине погружения установки (источника и измерителей) в водном слое.

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

Описана модель проводящей поляризующейся среды для аквальных измерений.

Ключевые слова: индукционно вызванная поляризация (ВПИ), гальванически вызванная поляризация (ВПП), заземлённая электрическая линия, трёх электродные измерительные линии, аквальный дифференциально-нормированный метод электроразведки, АДНМЭ, ЭМ измерения на акваториях.

ВВЕДЕНИЕ

Отличия морской электроразведки от наземной связаны со специфическим влиянием слоя морской воды. При работах в море имеется ряд преимуществ: простые условия заземления, возможность осуществлять непрерывную регистрацию в движении судна и использовать мощные источники питания, и большие измерительные и питающие линии, транспортировка которых не вызывает трудностей. Выдержанность сопротивления неполяризующегося первого слоя (морская вода), мощность которого легко определима, спокойная геоэлектрическая обстановка в верхней части разреза упрощают интерпретацию полученных результатов на малых разносах установок. Вместе с тем, хорошо проводящий слой морской воды экранирует нижележащие отложения, а гидродинамические процессы, протекающие в нем, приводят к появлению дополнительных помех [1].

Морские электрометрические исследования были впервые проведены в 1931 г. на Каспии в бухте Ильича около Баку [1]. Эти работы, выполнявшиеся под руководством С.Я. Литвинова и продолжавшиеся до 1937 г., осуществлялись по методике симметричного профилирования с целью картирования выходов коренных пород на дне моря. В 1951 г. они были возобновлены на Каспийском море у побережья Азербайджана и Дагестана.

Была разработана и использовалась методика дифференциального картировочного электропрофилирования, которое обычно осуществлялось при крупномасштабных детализационных работах в пределах сводовых частей структур, когда непосредственным объектом изучения являлись крутопадающие коренные пласты, выходящие на дно моря или перекрытые наносами небольшой мощности. Для этого вида работ использовались дифференциальные установки линейной конфигурации (называвшиеся «экранированной» и «комбинированной»), когда питающие и измерительные электроды располагались на одном многожильном кабеле.

В 1954–1959 гг. на основе дипольных установок, предложенных Л.М. Альпиным, были разработаны и внедрены методы непрерывных дипольно-осевых зондирований и непрерывного профилирования с повышенной глубиной исследования [2].

С 1959 по 1973 гг. электроразведочные работы проводились на Азовском, Каспийском и Чёрном морях. В процессе этих исследований были разработаны основы методики и техники различных модификаций морской электроразведки с искусственными источниками тока: 1) метод непрерывных дипольно-осевых зондирований (НДОЗ); 2) метод непрерывного профилирования (НП); 3) метод дифференциального картировочного электропрофилирования; 4) метод зондирований становлением магнитного поля (ЗСМ); 5) метод вызванной поляризации (ВП). При проведении измерений на постоянном токе также использовались установки, измерительные и питающие электроды которых размещались на дне (донные установки) [3, 4].

Методы сопротивлений (на постоянном и/или низкочастотном переменном токе) не особенно чувствительны к высокоомным зонам в породах, образующих морское ложе. Ток от расположенного на дне дипольного источника протекает преимущественно через воду, поэтому разность потенциалов, измеряемая приёмным диполем, контролируется электропроводностью воды.

Альтернативой явился морской магнитометрический метод сопротивлений (МММС) (в англоязычной литературе – magnetometric off-shore electrical sounding method (MOSES)) [23], основанный на магнитометрическом методе сопротивлений (ММС). В качестве источника использовалась вертикальная длинная линия, протягиваемая от поверхности моря до дна. Один из питающих электродов линии располагался вблизи дна, другой – на поверхности моря. Обратный ток протекал через воду и породы, образующие дно. Приёмник состоял из двух ортогональных датчиков магнитного поля, которые стационарно располагались на дне. Измерялись две горизонтальные компоненты магнитного поля в зависимости от частоты и расстояния между источником и приёмником (разносом).

Самые ранние морские работы дистанционным частотным зондированием (ДЧЗ) (в англоязычной литературе controll source electromagnetic (CSEM)) были выполнены британскими и американскими военно-морскими силами. В публикации 1968 года из Лаборатории подводного звука ВМС США, по-видимому, впервые предложены морские ДЧЗ, какими их знают сейчас, в узком диапазоне частот и широком диапазоне разностей [24].

В 70-е гг. в институте океанографии Скриппса начали разрабатываться ДЧЗ для исследования строения океанического дна [5]. Исследования, проведённые Ч. Коксом и его сотрудниками, показали, что уровень помех естественного электрического поля на частотах около 1 Гц чрезвычайно низок (≈ 1 пВ/м) – диапазон частот от 0.1 до 3-5 Гц известен как диапазон минимума естественного ЭМ поля. Поэтому слабые поля, создаваемые в земле придонным горизонтальным электрическим дипольным источником, могут быть зарегистрированы на расстоянии многих километров от источника. Так же было показано, что ДЧЗ чувствительно преимущественно к зонам относительно высокого удельного электрического сопротивления в отложениях, подстилающих морское дно. В противоположность этому, широко используемое магнитотеллурическое зондирование позволяло обнаружить электропроводящие зоны. В 1979 году был проведён эксперимент на воде глубиной около 3000 м с передачей 80 А на антенне длиной 800 м. Сигнал на частотах от 0,25 до 2,25 Гц был обнаружен на расстоянии 19 км. Целью исследований был срединно-океанический хребет [25].

В начале 1980-х гг. стал разрабатываться глубоководный ДЧЗ для нефтегазовой геологоразведки [26].

В 80-е гг. большой объём исследований буксируемыми установками для изучения проводимости и вызванной поляризации был выполнен Севморгео (г. Ленинград) [6, 7].

Начиная с 2000 г. на базе сухопутного дифференциально – нормированного метода электроразведки (ДНМЭ) [8, 9, 10] под руководством П.Ю. Легейдо стала разрабатываться и использоваться его надводная модификация – аквальные ДНМЭ [11, 12, 27, 28], а позднее, в конце 2000-х гг., аквальные ДНМЭ с подводной буксируемой системой (АДНМЭ с ПБС) [13]. В период с 2002 по 2003 гг. в разработках и проведении полевых работ принимали участие специалисты Севморгео, используя опыт технологии морских работ, накопленный ранее. В АДНМЭ и АДНМЭ с ПБС группа трёх электродных измерительных линий, буксируемых совместно с источником за судном, позволяет регистрировать сигнал переходного процесса ($\Delta U(t)$) и конечную разность сигнала переходного процесса ($\Delta^2 U(t)$) и рассчитывать ряд трансформант, подавляющих индукционную или поляризационную составляющие регистрируемого сигнала переходного процесса.

Большая часть аквальных электроразведочных методик использует заземлённую электрическую линию (или диполь) в качестве искусственного ЭМ источника. Такой источник легко реализовать технически, поместив заземления в проводящую водную толщу, и легко перемещать внутри неё или на её поверхности.

Ряд методов морской электроразведки изучают проводящие свойства геологической среды под водной толщей, но поляризационные характеристики

Земли остаются неизученными. В предлагаемой публикации основной упор делается на изучение процессов вызванной поляризации, возникающих в геологической среде и проявляющихся в виде ЭМ сигнала на измерителях, размещённых в водной толще. Такие процессы возникают при протекании гальванического или вихревого тока и по-разному проявляются на заземлённых линиях во время измерений [14].

Аквальная съёмка АДНМЭ и АДНМЭ с ПБС проводятся для изучения проводящих и поляризационных свойств геологических образований. Численные расчёты для публикации проведены на основе установок этих методов.

1. МОДЕЛЬ СРЕДЫ НА АКВАТОРИЯХ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВП

На акваториях среда представляет из себя особый случай сочетания водной толщи, перекрывающей геологическую среду. В первом приближении её можно аппроксимировать двухслойным полупространством. Верхняя – водная часть – проводящая, который зависит от содержания растворённых в воде солей и может достигать 7-2 См/м (0.143-0.5 Ом·м) в морских водоёмах [15] и 0.01 См/м (100 Ом·м) в пресноводных водоёмах. Водная толща, в общем случае, однофазна, в ней не возникают процессы ВП. Геологические образования проводящие, представляющиеся двухфазной (полифазной) средой, в которой протекают интенсивные релаксационные процессы, а ЭМ характеристики среды приобретают дисперсионные свойства (зависимость от частоты первичного тока или времени регистрации сигнала). Т.о. имеется две границы раздела сред воздух-вода и вода-Земля, воздух - непроводящая неполяризующаяся среда, вода - проводящая (для морских акваторий сильно проводящая) неполяризующаяся среда и Земля - проводящая поляризующаяся среда. Задачи геоэлектрики - изучение ЭМ свойств геологических образований, которые перекрыты водной толщей разной мощности и проводимости.

Изучение геологической среды в такой ситуации проводится с поверхности водной толщи, на границе водной толщи и геологической среды и внутри водной толщи.

В ДЧЗ в узком диапазоне частот и широком диапазоне разносов с донными станциями и донными косами измерение ЭМ сигнала проводится на границе водной толщи и геологических образований, а источник гармонического сигнала расположен внутри водного слоя.

В аквальных ДНМЭ – импульсный источник и измерители расположены на поверхности воды. В аквальных ДНМЭ с ПБС импульсное возбуждение и приём ЭМ сигнала проводится внутри водной толщи [13].

Существует методика использования вертикального импульсного источника ЭМ сигнала, располагающегося от поверхности до дна моря, и измерение так же вертикальными линиями, начинающимися на морском дне [29].

В ДЧЗ проводится изучение УЭС и, главным образом, определение присутствия высокоомных объектов в хорошо проводящей геологической среде,

такой же объект исследования при использовании вертикального источника и приёмника.

Задачи исследований аквальных АДНМЭ и аквальных АДНМЭ с ПБС определение УЭС и поляризационных характеристик геологической среды, перекрытой водным слоем. Возбуждение среды проводится электрической линией, размещённой вблизи поверхности воды или в водном слое. Измерение проводится электрическими линиями, расположенными в осевой области источника. Для таких измерений в условиях суши было показано [14], что сигнал становления ЭМ поля и гальванически вызванной поляризации имеют такой же знак, что и возбуждающий импульс, а сигнал индукционно вызванной поляризации, связанной с вихревым током, меняет знак на противоположный.

Если для условий суши геоэлектрический разрез, с проявлением ВП связанного только с вихревым током, случай редкий, можно сказать созданный искусственно при численном эксперименте, то для условий аквальных измерений такая ситуация вполне реальна, ведь водный слой не поляризуется и при определённых условиях плотность гальванического тока в геологических образованиях будет незначительной, а ВП будет связано с вихревым током становления, распространяющимся в геологической среде.

2. ПРИРОДА ВП ПРИ АКВАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ КАК РЕАКЦИЯ НА ИМПУЛЬСНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ СРЕДЫ

Работы методами АДНМЭ и АДНМЭ с ПБС проводятся в импульсном режиме, поэтому подробнее остановимся на протекании переходного процесса в двухслойном полупространстве, описанном выше, при использовании импульсного ЭМ источника - заземлённая линия.

Прохождение импульса тока через заземлённую линию создаёт систему гальванических токов в окружающем пространстве - в воде и геологических породах (рис. 1).

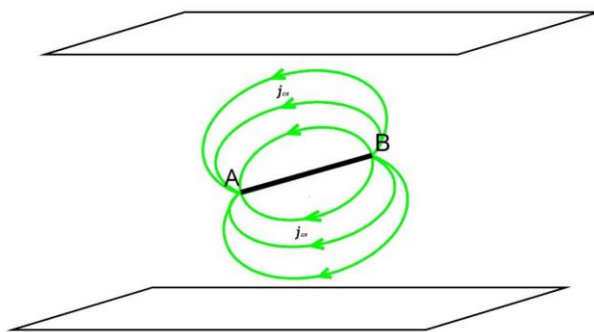


Рис. 1. Течение гальванического тока, созданного электрической линией, помещённой в водный слой.

Гальванический ток в ДФ среде [16, 17], которой является геологическая среда, приводит к ряду процессов по разделению зарядов на границе твёрдой и жидкой

фаз. Это процессы электрохимической и электрокинетической природы. После прекращения импульса тока ДФ среда возвращается в равновесное состояние, начинаются релаксационные процессы, они сопровождаются протеканием тока вызванной поляризации и индуцированием ЭМ сигнала, регистрируемого измерителями.

Одновременно с прекращением течения гальванического тока в проводящей среде возникают вихревые токи (рис. 2), сохраняющие структуру и направление гальванического тока. Основная плотность вихревых токов имеет форму кольца, расширяющегося в нижней части, плоскость кольца ортогональна границам раздела воздух-вода и вода-Земля и совпадает с осью источника АВ. Начинается диффузия вихревых токов вглубь проводящей среды и в меньшей степени вширь параллельно границам раздела во все направления.

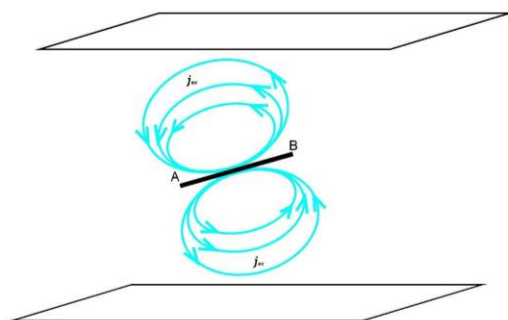


Рис. 2. Распространение вихревого тока после импульса электрической линии, помещённой в водный слой.

При диффузии вихревого тока в ДФ среде, в ней начинаются аналогичные процессы разделения зарядов [18, 19], как и во время течения гальванического тока. По мере затухания вихревого тока ДФ среда начинает возвращаться в равновесное состояние - возникают токи ВП, вызванные вихревым током. Токи индукционно вызванной поляризации создают ЭМ сигнал, регистрируемый измерителями совместно с сигналом гальванически вызванной поляризации и ЭМ индукции.

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).

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС НА ЗАЗЕМЛЁННЫХ ЛИНИЯХ, ПОМЕЩЁННЫХ В ВОДНЫЙ СЛОЙ НАД ПОЛЯРИЗУЮЩЕЙСЯ ЗЕМЛЁЙ

Использовался метод линейной фильтрации решения задачи ЭМ становления [7]. Первоначально получают частотную характеристику сигнала в широком диапазоне частот, затем путём преобразования Фурье получают решение во временной области.

3. МОДЕЛИ СРЕДЫ И ЭМ УСТАНОВКА ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Для численного эксперимента была выбрана простая среда - двухслойное полупространство. Водный слой хорошо проводящий, с УЭС 0.25 Ом·м, неполяризующийся. Проводящие геологические образования с УЭС 1.5 Ом·м, что свойственно для морских геоэлектрических моделей, поляризуемость Земли была задана 0 или 15%. Мощность воды составляла 100, 500 и 1000 м (табл. 1 и 2).

Временной диапазон изучения сигнала ограничивался от 100 мкс до 16 с.

Таблица 1

Модель неполяризующейся среды

Слой	ρ , Ом·м	η , %	h, м
1	0.25	0	100, 500, 1000
2	1.5	0	∞

Таблица 2

Модель поляризующейся среды

Слой	ρ , Ом·м	η , %	τ , с	c, б.р.	h, м
1	0.25	0			100, 500, 1000
2	1.5	15	5	0.5	∞

Установка эксперимента представляет из себя источник – заземлённую электрическую линию и ряд измерителей – осевых трёх электродных заземлённых линий, удаляющихся от источника. Схема установки: А 1000 В 150 М₁ 150 М₂ 150 М₃ 150 М₄ 150 М₅ 150 М₆ 150 М₇ 150 М₈ 150 М₉. Эта установка находится на поверхности воды ($z=0$) и погружается на глубины 250 и 500 м (рис. 3).

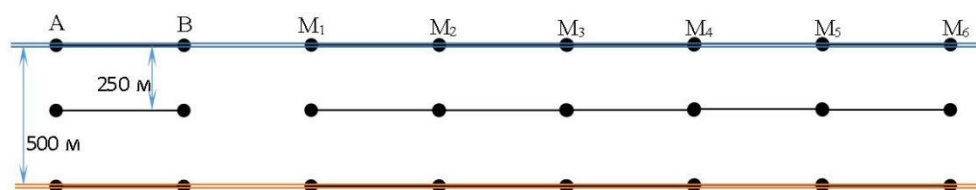


Рис. 3. Соосная установка численного эксперимента: каждый последующий 3-х электродный измеритель удаляется от источника на 150 м.

Проводится расчёт сигнала переходного процесса на каждой двух электродной измерительной линии (M_1M_2 , M_2M_3 , M_3M_4 , M_4M_5 , M_5M_6 и т.д.) и сигнал переходного процесса, конечная разность сигнала переходного процесса и трансформанта $P1$ на каждой трёх электродной измерительной линии ($M_1M_3M_5$, $M_2M_4M_6$, $M_3M_5M_7$, $M_4M_6M_8$, $M_5M_7M_9$) (рис. 4).

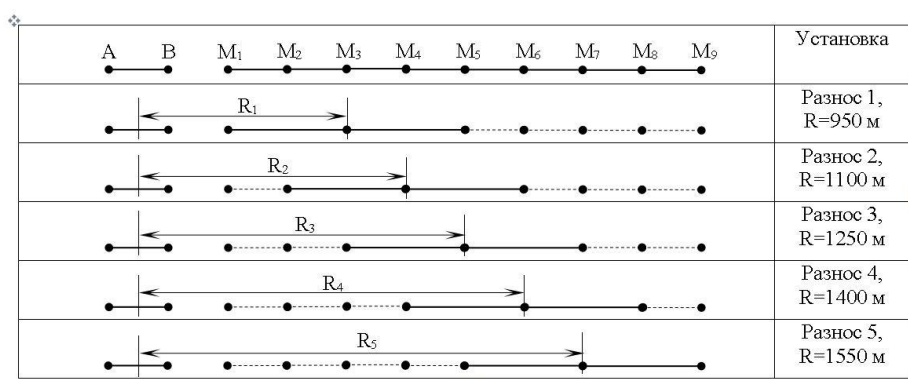


Рис. 4. Разносы трёх электродных измерительных линий для которых проводились расчёты.

4. ФОРМИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАНТЫ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ИНДУКЦИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИГНАЛА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

Весьма эффективен способ подавления индукции, реализованный в технологии дифференциально-нормированных измерений [20]. Приёмная линия представляет из себя трёх электродный заземлённый приёмник ($M_1M_2M_3$) (рис. 5), позволяющий одновременно регистрировать сигнал переходного процесса (ΔU) и конечную разность сигналов переходного процесса ($\Delta^2 U$) (2) и (3).

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

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



Рис. 5. Схема установки ДНМЭ.

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС НА ЗАЗЕМЛЁННЫХ ЛИНИЯХ, ПОМЕЩЁННЫХ В ВОДНЫЙ СЛОЙ НАД ПОЛЯРИЗУЮЩЕЙСЯ ЗЕМЛЁЙ

Для источника электрическая линия изменение в пространстве и времени индукционной (вихревой) и поляризационной составляющей, вызванной гальваническим током, будет существенно различаться [8, 9]. Пространственная неоднородность сигнала, создаваемого диффузией вихревого тока, с течением переходного процесса уменьшается и стремится к нулю. Пространственная неоднородность гальванического тока во время импульса постоянного тока сохраняется всё время, после его выключения, повторяя структуру гальванического тока, начинает течь ток ВП, индуцируя электромагнитный сигнал, регистрируемый приёмником. Пространственная неоднородность этого тока (и ЭМ отклика, созданного им) сохраняется на протяжении всего переходного процесса.

Расчёт отношения второй конечной разности потенциалов к первой формирует трансформанту, названную PI [8, 9].

$$PI_{M_1 M_2 M_3} = \frac{\Delta^2 U_{M_1 M_2 M_3}}{\Delta U_{M_1 M_3}} = \frac{\Delta U_{M_1 M_2} - \Delta U_{M_2 M_3}}{\Delta U_{M_1 M_2} + \Delta U_{M_2 M_3}} \quad (4)$$

Трансформанта PI представляет логарифм пространственной неоднородности напряжённости электромагнитного поля, т.о. изменяющаяся на несколько порядков величина может быть показана в линейном масштабе, что удобно для визуализации и восприятия.

$$PI = \frac{d_r E}{E} = d_r \ln E$$

$PI(t)$ подавляет сигнал становления поля в поздней стадии и подчёркивает сигнал, связанный с поляризуемостью среды [20].

5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты расчётов покажем на билигарифмических графиках с учётом знака. Такое представление данных позволяет разделить положительные и отрицательные значения и сохранить логарифмический масштаб [21, 22]. Для каждой трёх электродной линии покажем сигнал переходного процесса и конечную разность сигнала переходного процесса.

Для модели с глубиной моря 500 м и плавучей установки (т.е. когда установка отделена от поляризующейся среды толщей неполяризующейся среды мощностью 500 м) на всех измерителях, удаляющихся от источника, на поздних временах наблюдается смена знака конечной разности, знак сигнала переходного процесса остаётся неизменным на протяжении всего переходного процесса (рис. 6). Такая ситуация вызвана большими значениями сигнала переходного процесса на дальней части трёх электродного измерителя, чем на ближней. При этом знак сигнала переходного процесса остаётся таким же, как и знак первичного импульса.

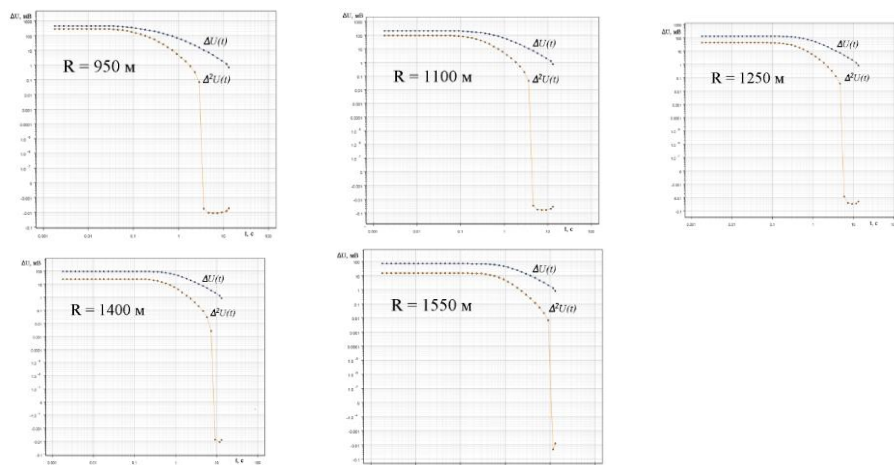


Рис. 6. Сигнал $\Delta U(t)$ и $\Delta^2 U(t)$ на, удаляющихся от источника, 3-х электродных измерителях в билогарифмическом масштабе с учётом знака при глубине моря 500 м для плавучей линии. Поляризуемость Земли – 15%.

Можно заметить смещение момента смены знака сигнала $\Delta^2 U$ при удалении от источника.

При погружении установки происходит изменение характера проявления поляризационного сигнала. Время смены знака сигнала $\Delta^2 U$ смещается на более поздние значения (рис. 7).

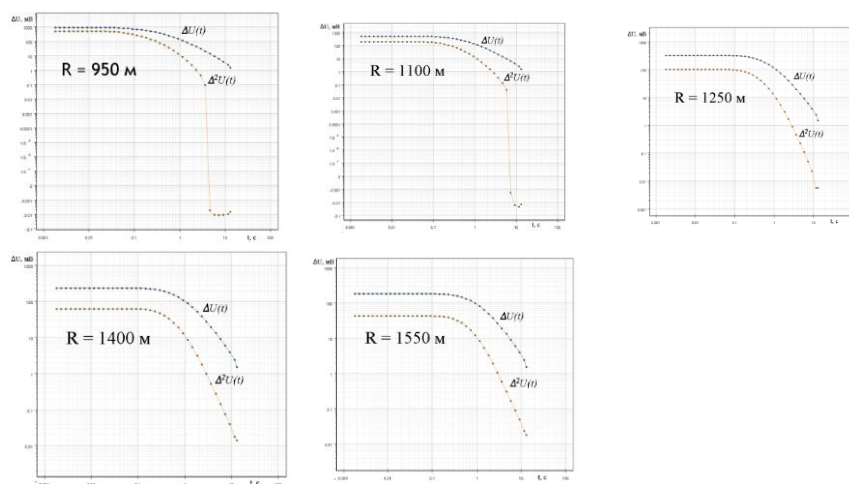


Рис. 7. Сигнал $\Delta U(t)$ и $\Delta^2 U(t)$ на, удаляющихся от источника, 3-х электродных измерителях в билогарифмическом масштабе с учётом знака при глубине моря 500 м для установки, погружённой на 250 м. Поляризуемость Земли – 15%.

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС НА ЗАЗЕМЛЁННЫХ ЛИНИЯХ, ПОМЕЩЁННЫХ В ВОДНЫЙ СЛОЙ НАД ПОЛЯРИЗУЮЩЕЙСЯ ЗЕМЛЁЙ

Для установки расположенной на дне моря сигнал не меняет знак во время переходного процесса (рис. 8), он схож с измерениями на суше, когда ВП, главным образом, связано с гальваническим током [14].

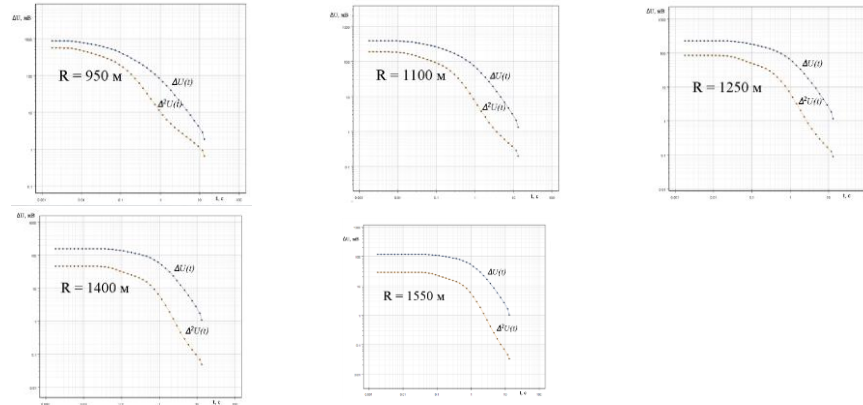


Рис. 8. Сигнал $\Delta U(t)$ и $\Delta^2 U(t)$ на, удаляющихся от источника, 3-х электродных измерителях в билогарифмическом масштабе с учётом знака при глубине моря 500 м для установки лежащей на дне моря. Поляризуемость Земли – 15%.

Для модели с мощностью воды 1000 м сохраняется тенденция изменения сигнала на измерительных линиях при их погружении и удалении от источника.

Для модели с глубиной водного слоя 100 м изменения знака сигнала $\Delta^2 U$ не отмечено при всех положениях измерительной линии.

Трансформанта PI , являющаяся отношением $\Delta^2 U$ к ΔU , в осевой области источника за время переходного процесса определяется преимущественным влиянием одного из эффектов: становления поля, гальванически и индукционно вызванной поляризации. При преобладании становления поля на ранних временах (в условиях волновой зоны распространения первичного поля) на трансформанте наблюдается асимптота, определяемая геометрией установки, затем нисходящая ветвь, связанная с уменьшением пространственной неоднородности поля становления.

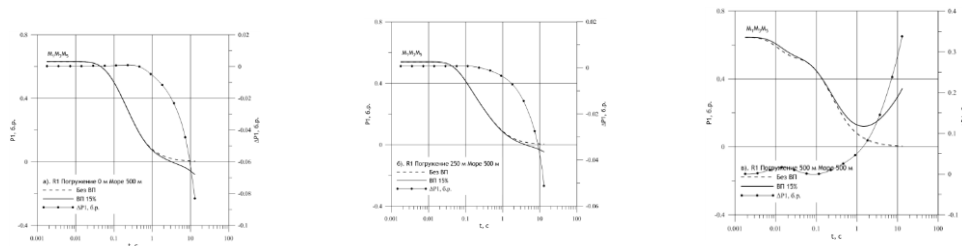


Рис. 9. Трансформанта $PI(t)$ от неполяризующейся и поляризующейся (η геологической среды – 15%) моделей и расхождение этих сигналов на измерителе $M_1M_3M_5$ при погружении установки на 0, 250 и 500 м. Глубина моря 500 м.

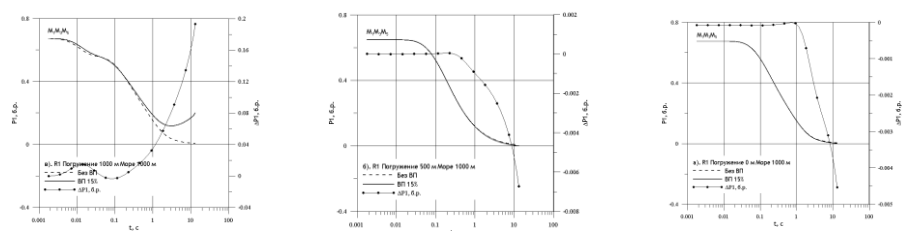


Рис. 10. Трансформанта $PI(t)$ от неполяризующейся и поляризующейся (η геологической среды – 15%) моделей и расхождение этих сигналов на измерителе $M_1M_3M_5$ при погружении установки на 0, 500 и 1000 м. Глубина моря 1000 м.

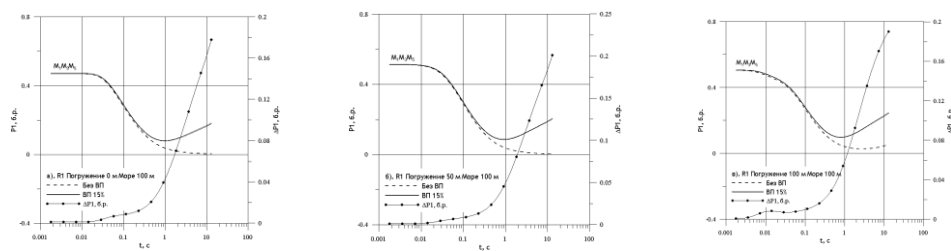


Рис. 11. Трансформанта $PI(t)$ от неполяризующейся и поляризующейся (η геологической среды – 15%) моделей и расхождение этих сигналов на измерителе $M_1M_3M_5$ при погружении установки на 0, 50 и 100 м. Глубина моря 100 м.

По мере стремления пространственной неоднородности поля, связанной со становлением поля, трансформанта приобретает характер, определяемый гальванически вызванной поляризацией – это восходящая правая ветвь (рис. 9в, рис. 10в, рис. 11) и правая асимптота, которая так же определяется геометрией установки.

В случае преимущественного влияния индукционно вызванной поляризации, вслед за нисходящей левой ветвью следует смена знака трансформанты (рис. 9а и

рис. 9б), связанная со сменой знака второй конечной разности потенциалов. Смена знака сигнала разности потенциалов, связанная с проявлением ВПИ, происходит на более поздних временах, чем у $\Delta^2 U$. Если измерения длятся до этого момента, на трансформанте возникают экстремумы и скачкообразный переход из области отрицательных значений PI в положительные и правая асимптота, определяемая геометрией установки.

Нужно подчеркнуть, что трансформанта определяется именно соотношением $\Delta^2 U$ и ΔU , поэтому её знак зависит от знаков двух величин и будет иметь отрицательные значения, если только одна из них будет отрицательной, если же обе величины будут отрицательными трансформанта вновь приобретёт положительные значения. Переход через ноль ΔU , находящейся в знаменателе, на трансформанте PI будет сопровождаться экстремумом, связанным с делением на стремящиеся к нулю величины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сигнал на измерительных линиях претерпевает значительные изменения при удалении от источника и при изменении толщины отделяющей установку от поляризуемой среды, последнее происходит либо при погружении установки, либо при увеличении глубины акватории.

В трансформанте ЭМ поля $P1$ по-разному проявляются сигналы ЭМ индукции, гальванически вызванной поляризации и индукционно вызванной поляризации.

Сигнал вызванной поляризации проявляется на временах измерений до 16 с при глубине моря 100, 500 и 1000 м. При расположении установки в верхней части водного слоя при мощности воды 500 и 1000 м, т.е. при значительной толщине неполяризуемой толщи, сигнал ВП, опираясь на вид трансформанты PI , проявляется как индукционно вызванная поляризация - связанная с вихревыми токами. При глубине моря 100 м и придонном положении установки ВП проявляется как гальванически вызванная поляризация, т.е. связанная с гальваническим током. Однако разные способы возбуждения процессов ВП в геологической среде позволяют изучать одни и те же геоэлектрические (поляризационные) характеристики.

С ростом расстояния между источником и измерителем увеличивается временной диапазон (до более поздних времён) преимущественного проявления становления поля.

Для выполнения практических измерений необходимо привлекать априорную информацию о глубинах водного слоя и проводить математическое моделирование для оценки возможности изучения поляризационных характеристик геологической среды, перекрытой толщей воды.

Список литературы

1. Морские геофизические исследования / Под. ред. Я.П. Маловицкий, А.А. Гавельганц, Л.И. Коган и др. М.: Недра, 1977. 375 с.

2. Назаренко О.В. Методика непрерывных морских электрических зондирований // Геология нефти и газа. 1957. №8. С. 40–45.
3. Ваньян Л.Л. О теоретических кривых морского электрического зондирования донной установкой // Прикладная геофизика. 1956. Вып. 15. С. 83–90.
4. Терёхин Е.И. Теоретические основы электрического зондирования с установкой погружённой в воду // Прикладная геофизика. 1958. Вып. 18. С.78–102.
5. Чейв А.Д. Морское электромагнитное зондирование с контролируемым источником поля: эволюция в технологии // Нефтегазовое обозрение. 2009. №2. С. 1.
6. 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: сб. науч. трудов. М.:1988, С. 124-132.
7. Петров А.А. Возможности метода становления электрического поля при поисках углеводородов в шельфовых зонах // Геофизика. 2000. №5. С. 21-26.
8. Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Дифференциально-нормированный метод электроразведки при прямых поисках залежей углеводородов // Геофизика. 1995. № 4. С. 42–45.
9. Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Информативность дифференциальных методов электроразведки при изучении поляризующихся сред // Геофизика. 1997. №3. С. 49–56.
10. 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.
11. Богданов А.Г. и др. Опыт применения и геологические результаты работ дифференциальным нормированным методом электроразведки на российской акватории Каспийского моря // Геофизика. 2004. №5. С.38–41.
12. Колесов В.В. и др. Разведка и обустройство месторождений в прибрежной зоне Обской губы // Газовая промышленность. 2008. №12. С.66–68.
13. Ситников А.А. и др. Аппаратура, устройства и системы наблюдений для решения нефтегазопроисловых и инженерно-геологических задач дифференциально-нормированным методом электроразведки (ДНМЭ) на акваториях // Приборы и системы разведочной геофизики. 2017. №2. С. 34–41.
14. 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.
15. Основы морской электроразведки / Под ред. Н.И. Калашников, Ф.Л. Дудкин, Ю.Б. Николаенко. К.: Наука думка, 1980. С. 125-126.
16. Шейнманн М.С. Современные физические основы теории электроразведки. М. : Недра, 1969. 224 с.
17. Каменецкий Ф.М., Тригубович Г.М., Чернышёв А.В. Три лекции о вызванной поляризации геологической среды. Мюнхен: Вела Ферлаг, 2014. 58 с.
18. Кожевников Н.О. Быстропротекающая индукционно-вызванная поляризация в мёрзлых породах // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 4. С. 527–540.
19. 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.
20. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей / Под. ред. В.К. Хмелевского, И.Н. Модина, А.Г. Яковлева. М.: 2005. 311 с.
21. Захаркин А.К., Тарло Н.Н. Физическое моделирование метода ЗСБ // Поиск полезных ископаемых в Сибири методом зондирования становлением поля. Новосибирск, СНИИГТиМС, 1988. С.30-44.
22. Захаркин А.К., Тарло Н.Н. К методике оценки возможностей аппаратуры и средств обработки данных импульсной электроразведки в выделении «тонкой структуры» переходного процесса // Неклассическая геоэлектрика: матер. междунар. конф., НВНИИГТ. Саратов, 1995. С. 61-62.
23. Edwards R.N. et al. First results of the MOSES experiment: Sea sediment conductivity and thickness determination, Bute Inlet, British Columbia, by magnetometric offshore electrical sounding \ Geophysics. vol. 50. no. 1. 1985. pp. 153-161.

24. Bannister P.R. Determination of the electrical conductivity of the sea bed in shallow waters // Geophysics. 1968. Vol. 33. no. 6.
25. Young, P., Cox C. Electromagnetic active source sounding near the East Pacific Rise // Geophysical Research Letters. 1981. no 8. pp.1043–1046.
26. Sainson S. Electromagnetic Seabed Logging. Springer International Publishing, Switzerland 2017. p. 549. ISBN 978-3-319-45353-8 ISBN 978-3-319-45355-2 (eBook) DOI 0.1007/978-3-319-45355-2.
27. Veeken P. et al. Geoelectric modelling with separation between electromagnetic and induced polarization field components // First break. 2009. Vol. 27. December. pp.53–64.
28. Veeken P. et al. Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration // Geophysics. 2009. no 74. pp.47–59.
29. Barsukov P., Fainberg E., Singer B. A method for hydrocarbon reservoir mapping and apparatus for use when performing the method. International patent WO 2007/053025. 2007.

TRANSIENT PROCESS ON ELECTRICAL LINES INTO WATER LAYER UNDER CONDUCTIVE POLARIZABLE EARTH

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 scientific goal of the publication is to investigate the transient process of the electric field into the water overlapping the conducting polarizable Earth, for the axial region of the source an electric line for a setup of successive measuring lines. Use for this purpose a number of one-dimensional models in which the induced polarization (IP) occurs in geological formations and is not created in the water layer. Show the difference in EM signal manifestation associated with polarization caused by galvanic (IPG) and eddy current (IPI) in measurements of the signal of the transient process on 3-electrode measuring lines at different depth of immersion of the installation (source and receivers) in the water layer.

The study is based on the results of solving a direct problem of TEM with electric lines, in which the IP is taken into account by introducing the frequency-dependent resistivity by the Cole-Cole formula. And the construction of the dependence of the signal of the transient process ($\Delta U(t)$), the second finite difference of the transient signal ($\Delta^2 U(t)$) and the EM field transformation ($P1(t)$).

A model of a conducting polarizable medium for aquatic measurements is described.

Keywords: induction-induced polarization (IPI), galvanically induced polarization, IPG, grounded electrical line, aquatic EM measurements, transient process, induction induced polarization, IPI, three electrode measuring lines, aquatic differential-normalized electrical prospecting method, ADNME.

References

1. Morskije geofizicheskie issledovaniya (Marine Geophysical Research). By ed. Ya.P. Malovitskii, A.A. Gagelganc, L.I. Kogan et al. Moscow: Nedra, 1977, 375 p. (In Russian).
2. Nazarenko O.V. Metodika neprerivnykh morskikh elektricheskikh zondirovaniy (The method of continuous marine electrical sounding). Geology of oil and gas, 1957, no 8, pp. 40–45 (In Russian).

3. Vaniyan L.L. O teoreticheskikh krivikh morskogo elektricheskogo zondirovaniya donnoy ustanovkoy (Aboute theoretical curves of marine electrical sounding by bottom seting). *Applied Geophysics*, 1956, Issue 15, pp. 83–90 (In Russian).
4. Terekhin E.I. Teoreticheskie osnovbi elektricheskogo zondirovaniya s ustanovkoy pogruzhonnoy v vodu (Theoretical basis of electrical sounding with a submersible setup), 1958, Issue 18, pp. 78–102 (In Russian).
5. Cheiv A.D. Morskoe elektromagnitnoe zondirovanie s kontrolliruemim istochnikom polya: evoluciya v tekhnologii (Marine electromagnetic sounding with a controlled field source: evolution in technology). *Oil and Gas Review*, 2009, no 2, pp. 1 (In Russian).
6. Vishnyakov A.E., Lisizin E.D., Yanevich M.Yu. Vliyanie vremennikh parametrov vizvanoy 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).
7. Petrov A.A. Vozmozhnosti metoda stanovleniya elektricheskogo polya pry poiskakh uglevodorodov v shelfovykh zonakh (The possibilities of the TEM in the search for hydrocarbons in the shelf zones)/ *Geophysics*, 2000, no 5, pp. 21–26 (In Russian).
8. Legeydo P.Yu., Mandelbaum M.M., Pikhlinitskiy N.I. Differentsialno-normirovanniy metod elektrorazvedki pry pryamikh poiskakh zalezhey uglevodorodov (Differensial-normalayzed method of electroprospecting for HC research). *Geophysics*, 1995, no 4, pp. 42–45 (In Russian).
9. Legeydo P.Yu., Mandelbaum M.M., Pikhlinitskiy N.I. Informativnost differentsialnykh metodov elektrorazvedki pry izuchenii polarizuyushikhsya sred (Informativity of differential methods of electroprospecting for polarizable medium research). *Geophysics*, 1997, no 3, pp. 49–56 (In Russian).
10. Legeydo P.Yu. Teoriya i tekhnologiya differentsialno-normirovannoy geoelektriki dlya izucheniya polarizuyushikhsya razrezov v neftegazovoy geofizike (Theory and thecnology differensial-normalayzed geoelectricalprospecting for polarizable ground in oil&gas geophysics research). PhD Thesis. Irkutsk: IrGTU, 1998, 198 p.
11. Bogdanov A.G. et al. Opit primeneniya i geologicheskije rezultaty rabot differentsialno-normirovannim metodom elektrorazvedki na rossiiskoy akvatorii Kaspiiskogo morya (Experience of application and geological results of works by differential normalized method of electrical prospecting in the Russian water area of the Caspian Sea). *Geophysics*, 2004, no 5, pp. 38–41 (In Russian).
12. Kolesov V.V. et al. Razvedka i obustroystvo mestorozhdenii v pribrezhnoy zone Obskoy Gubi (Exploration and development of deposits in the coastal zone of the Ob Bay). *Gas industry*, 2008, no 12, pp. 66–68 (In Russian).
13. Sitnikov A.A. et al. Apparatura, ustroystva i sistemy mabludenii dlya resheniya neftegazoposkovikh i inzhenerno-geologicheskikh zadach differentsialno-normirovannim metodom elektrorazvedki (DNME) na akvatoriakh (Apparatus, devices and observing systems for solving oil and gas exploration and engineering-geological problems by differential-normalized method of electrical prospecting (DNME) in water areas). *Instruments and systems of exploration geophysics*, 2017, no2, pp. 42–49 (In Russian).
14. Ageenkov E.V., Sitnikov A.A., Pesterev I.Yu. Proyavlenie raznykh tipov vizvanoy polarizatsii v elektromagnitnykh izmereniyakh zazemlennoy liniy (Display of induce polarization different types in electromagnetic measurements by the line). *Geophysics*, 2018, no 2, pp. 37–43 (In Russian).
15. Osnovi morskoy elektrorazvedki (Basics of Marine Electrical Exploration). By ed. N.I. Kalashnikov, F.L. Dudkin, Yu.B. Nikolaenko. Kiev: Nauka dumka, 1980, 208 p (In Russian).
16. Sheinmann M.S. Sovremennii fizicheskie osnovi teorii elektrorazvedki (Modern physical foundations of the theory of electrical exploration). Moscow: Nedra, 1969, 224 p. (In Russian).
17. Kamenetsky F.M., Trigubovich G.M., Chernyshev A.V. Tri lektsii o vizvanoy polarizatsii geologicheskoy sredy (Three lectures about IP of the geological environment). Munich: Vela Verlag, 2014, 58 p. (In Russian).
18. Kozhevnikov N.O. Bistroydeyushyey induktsionno-vizvanoy polarizatsiya v merzlykh porodakh (Fast-decaying inductive IP in frozen ground). *Geologi and Geophysics*, 2012, Vol. 53, no 4, pp. 527–540 (In Russian).
19. Hallbauer-Zadorozhnaya V.Yu. Processy proiskhodyashie v gornikh porodakh pri nalozhenii elektricheskogo toka I raznosty potentsialov: vizvannaya polarizatsiya (The processes taking place in

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС НА ЗАЗЕМЛЁННЫХ ЛИНИЯХ, ПОМЕЩЁННЫХ В ВОДНЫЙ СЛОЙ НАД ПОЛЯРИЗУЮЩЕЙСЯ ЗЕМЛЁЙ

- rocks when in electric current and potential difference: induce polarization). Questions of natural science, 2016, 3(11), pp. 76–79 (In Russian).
20. Electrorazvedka: posobie po electrorazvedochnoy praktike dlya studentov geofizicheskikh specialnostey (Electrical Exploration: A Guide to Electrical Exploration Practice for Students of Geophysical Specialties). By ed. V.K. Khmelevskogo, I.N. Modina, A.G. Yakovleva. Moscow, 2005, 311 p. (In Russian).
 21. Zakharkin A.K., TarloN.N. Fizicheskoe modelirovanie metoda ZSB (Physical modeling of the method TEM). Research for minerals in Siberia by the method TEM. Novosibirsk, SNIIGGIMS, 1988, pp.30-44 (In Russian).
 22. Zakharkin A.K., Tarlo N.N. K metodike ocenki vozmozhnostey apparatury i sredstv obrabotki dannikh impulsnoy electrorazvedki v videlenii "tonkoy struktury" perekhodnogo processa (To the methodology for evaluating the capabilities of apparatus and means for processing pulsed electrical prospecting data in isolating the "fine structure" of the transient process). Non-classical geoelectric: Materials of the International Conference., NVNIIGG. Saratov, 1995, pp. 61-62 (In Russian).
 23. Edwards R.N. et al. First results of the MOSES experiment: Sea sediment conductivity and thickness determination, Bute Inlet, British Columbia, by magnetometric offshore electrical sounding. Geophysics, vol. 50, no. 1, 1985, pp. 153-161.
 24. Bannister P.R. Determination of the electrical conductivity of the sea bed in shallow waters. Geophysics, vol. 33, no. 6, 1968.
 25. Young, P., Cox C. Electromagnetic active source sounding near the East Pacific Rise. Geophysical Research Letters, 1981, 8, pp.1043–1046.
 26. Sainson S. Electromagnetic Seabed Logging. Springer International Publishing, Switzerland 2017. p. 549. ISBN 978-3-319-45353-8 ISBN 978-3-319-45355-2 (eBook) DOI 0.1007/978-3-319-45355-2.
 27. Veeken P. et al. Geoelectric modelling with separation between electromagnetic and induced polarization field components. First break, 2009, Vol. 27, December, pp.53–64.
 28. Veeken P. et al. Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration. Geophysics, 2009, Vol. 74, pp.47–59.
 29. Barsukov P., Fainberg E., Singer B. A method for hydrocarbon reservoir mapping and apparatus for use when performing the method. International patent WO 2007/053025. 2007.

Поступила в редакцию 23.08.2019