

Аквальная съёмка дифференциально-нормированным методом электроразведки (АДНМЭ) и непрерывные дипольные электромагнитные зондирования (НДЭМЗ) для нефтегазопроисловых и инженерно-геологических работ**Aqual survey by the differential-normalized method of electrical prospecting (ADNME) and continuous dipole electromagnetic sounding (NDEMZ) for oil and gas exploration and geological-engineering works**

А.А. Ситников (ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания» (ООО «СГНПК»)), С.А. Иванов (ООО «СГНПК»)), П.П. Жуган (ООО «СГНПК»)), Е.В. Агеенков* (ООО «Объединенная Геофизическая Компания» (ОГК))

A.A. Sitnikov (LLC «Siberian Geophysical Research Production Company» (LLC «SGRPC»)), S.A. Ivanov (LLC «SGRPC»)), P.P. Zhugan (LLC «SGRPC»)), E.V. Ageenkov* (LLC «United Geophysical Company»))

Введение

На пресных и солёных акваториях проводятся нефтегазопроисловые и инженерно-геологические работы методами АДНМЭ и НДЭМЗ.

Для АДНМЭ источником импульсного сигнала является линия АВ, её гальванические контакты находятся в водном слое. Для измерения сигнала во время пропускания тока и переходного процесса применяется несколько трёхэлектродных измерительных линий $X_k X_m X_n$, расположенных в водном слое в осевой области источника на разных разносах. Измерение на таких линиях разности потенциалов (ΔU), второй конечной разности потенциалов ($\Delta^2 U$), сигнала переходного процесса ($\Delta U(t)$) и второй конечной разности сигнала переходного процесса ($\Delta^2 U(t)$), трансформирование этих измерений ($DU(t)$, $D^2 U(t)$, $P_1(t)$, $D\phi(t)$, $Ps(t)$) и инверсия позволяет изучать распределение с глубиной проводящих и поляризационных характеристик геологической среды и решить задачи поиска и разведки месторождений УВ.

Для малоглубинной и более детальной съёмки НДЭМЗ применяется аналогичный источник – линия АВ и большее количество разносов измерительных линий. Измеряется разность потенциалов ($\Delta U(r)$) и сигнал переходного процесса для всех разносов ($\Delta U(t, r)$), которые трансформируются в кажущееся сопротивление на постоянном токе ($\rho_k(r)$) и во время переходного процесса ($\rho_r(t, r)$). Такие измерения позволяют латерально и вертикально изучить проводящие и поляризующиеся свойства геологической среды, определить кровлю и подошву многолетнемерзлых пород (ММП), изменение мощности глинистых и песчаных разностей, выделить области распространения криопэгов и решать ряд инженерно-геологических задач.

Abstract

Oil and gas exploration and geological-engineering works are carried out on the fresh and salt water areas by the methods of ADNME and NDEMZ.

ADNME is a time-domain method with grounded lines that the electrodynamic and polarization response research from the geological environment.

Oil and gas exploration and geological-engineering works are carried out on the fresh and salt water areas by the methods of ADNME and NDEMZ.

Technologically, ADNMEs are implemented as measurements in motion with a towed streamer as modifications that allow measurements at small (10-15 m) and large (up to 1000 m) depths of the sea, which significantly expands the territorial possibilities of its use.

Off-shore differential-normalized method of electrical-prospecting (ADNME), developed by LLC «SGRPC» company, allows mapping the distribution of the electrical resistivity of the geological environment and polarizability of rocks. The predominant prospecting indicator is a number of anomalies of the induced polarization occurring in the areas of distribution of halos of dispersion over the hydrocarbon deposits.

The possibility of simultaneous obtaining information on the geoelectric and polarization properties of the medium makes it possible to significantly improve both the quality of the geological interpretation and the informative value of the results obtained, in contrast to most methods where the prediction is based only on the electrical resistivity parameter.

This method has been successfully tested in diverse geoscience conditions including prospecting under halogen- and carbon-bearing low-conductivity shield with widespread development of trap magmatism, in the areas of ancient and young platforms, continental depressions, fore deeps, in freshwater reservoirs and on the shelf of inland waters and marginal seas.

The developed method NDEMZ for geological-engineering problems solving allows lateral and vertical differentiation of bottom sediments to a depth of 300-500 m in order to determine the roof and bottom of the permafrost, to highlight the area of distribution of cryopegs, areas of «gas pockets» development, changes in thickness of clay and sandy sediments.

АДНМЭ - метод импульсной электроразведки для изучения становления и вызванной поляризации заземлёнными электрическими линиями

Аквальный дифференциально-нормированный метод электроразведки применяется для нефтегазопромысловых работ на пресноводных и солёных водоёмах (Богданов и др., 2004; Колесов и др., 2008; Veeken и др., 2009a и 2009b). АДНМЭ – это импульсный метод переходных процессов с заземлёнными линиями, изучающий электродинамический и поляризационный отклик от геологической среды.

Геологическая среда с точки зрения современной геоэлектрики представляется многофазным гетерогенным образованием обладающим дисперсией электромагнитных (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 мёрзлых образований или примесей. Интенсивные процессы вызванной поляризации протекают в областях вкрапленной сульфидизации, которая возникает как в зонах оруденения, так и под воздействием миграции насыщенного углеводородом газа из областей нефтесодержащих пород вверх по разрезу.

Залежь УВ активно воздействует на вышележащие породы, изменяя их физические свойства, это находит отражение в геофизических полях, измеряемых на поверхности Земли. Лёгкие УВ в процессе конвекции и диффузии проходят сквозь покрывку залежи и мигрируют в верхние

геологические слои. Миграция УВ сопровождается взаимодействием с вмещающими породами. Отмечается карбонатизация и пиритизация пород, образование магнитных и радиоактивных минералов. Под воздействием теплового потока отмечается незначительное разуплотнение пород от залежи до поверхности. С химической точки зрения образуется восстановительная обстановка от залежи до первого регионального водоупора, выше которого кислород воздуха создаёт окислительную обстановку, т.е. наблюдается некоторый «столб» изменённых под воздействием залежи пород. Хотя изменения не носят контрастный характер, за счёт большого объёма изменённых пород, они фиксируются в геофизических измерениях. В частности, вторичная вкрапленная сульфидизация и восстановительная обстановка в ореоле над залежью вызывают аномалии вызванной поляризации (ВП), которые фиксируются измерениями на поверхности Земли и внутри водной толщи, перекрывающей геологические слои на акваториях.

Электромагнитный сигнал переходного процесса формирует диффузионный процесс становления ЭМ поля и ряд релаксационных процессов, различающихся по скорости протекания, в том числе вызванную поляризацию, характеризующуюся временами релаксации от десятков мс до нескольких с.

Эти составляющие переходного процесса различаются изменением во времени пространственной неоднородности ЭМ сигнала ($\Delta^2 U(t)$) при возбуждении переходного процесса заземлённой линией. Становление распространяется в земле согласно закону диффузии, вихревые токи просачиваются вглубь и вширь проводящей геологической среды, стремятся к равномерному растеканию в ней, их плотность со временем выравнивается, а неоднородность стремится к нулю. Плотность тока вызванной поляризации, связанная с гальваническим током заземлённого источника, сохраняет свою неоднородность на протяжении всего переходного процесса и зависит от расстояния до источника.

Поэтому измерение пространственной неоднородности поля и формирование трансформант, подчёркивающих это свойство, позволяет выделить диапазоны времени преобладания откликов становления и поляризации, в регистрируемом ЭМ сигнале.

При глубине моря до 100 м используется буксируемая установка, которая перемещается в подповерхностном водном слое на глубине 10-15 м (Рис. 1). При глубине водоёмов от 100 до 1000 м используется, разработанная ООО «СГНПК» подводная буксируемая система (АДНМЭ с ПБС) (Ситников и др., 2017), измерительную часть которой можно погружать до глубины 500 м (Рис. 2). Технологичность метода связана с буксированием установки судном во время измерений, при этом обеспечивается высокая плотность наблюдений и скорость выполнения полевых работ (съёмка со скоростью 2.5 – 4.5 узла (4.6 – 8.3 км/ч)).

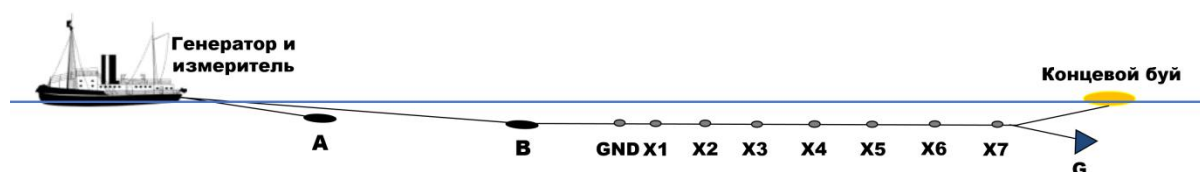


Рисунок 1. Установка АДНМЭ для акваторий глубиной 50-70 м.

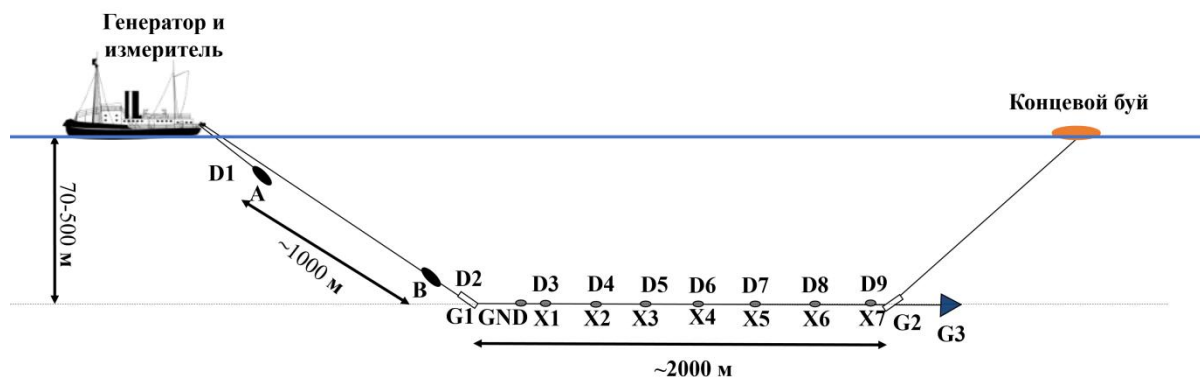


Рисунок 2. Установка АДНМЭ с ПБС для глубоководных акваторий.

Работы проводятся специализированной электроразведочной косой (Ситников и др., 2017), выполненной из комбинированного кабель-троса, имеющего питающий и измерительный участки. Кабель косы практически нерастяжим при нагрузках, для его изготовления используется специальное синтетическое волокно, оболочка кабеля характеризуется низким коэффициентом трения о воду и высокой прочностью. Участок питающей линии сделан в виде коаксиального кабеля – внутри медной силовой оплётки проходят проводники приёмной линии. Силовые жилы имеют необходимое сечение для прохождения большого тока. Общая длина косы около 3000 м. Длина питающей линии на косе – около 1000 м.

Приёмные электроды выполнены из неполяризующегося проводника. Длина электрода составляет около 2 м.

Перед полевыми исследованиями выполняется ЭМ и гидродинамическое численное моделирование, определяется оптимальная конфигурация косы для её стабильного движения в водном слое на нужной глубине для получения информативных данных в конкретных геолого-геологических условиях.

Коса на участке питающий электрод В – приёмный электрод Х7 может быть заглублена до 500 м. Стабилизация косы осуществляется с помощью установленной системы заглубителей и гидродинамических натяжителей. Заглубления линии отображаются в показаниях датчиков глубины, располагающихся в районе электрода В и на измерительной части косы. Она завершается буксировочным участком, на конце которого закреплён буй (Рис. 2), движущийся по поверхности моря. Он частично выполняет функцию стабилизации всей косы, а также несёт на себе радио трекер с приёмником сигнала спутниковой навигации. Это устройство так же разработано ООО «СГНПК».

Конструкция косы, наряду с низким сопротивлением заземления и малым дрейфом нуля, обеспечивает подавление шумов, возникающих за счёт движения электрода в толще воды.

Сильно проводящая вода (с УЭС от 0.2 Ом·м до 0.85 Ом·м) позволяет пропускать большой ток и его амплитуда во многом определяется мощностью источника электроэнергии и сопротивлением подводных кабелей к электродам силовой установки. Разнополярные импульсы с измерительной паузой коммутируются тиристорным ключом, разработанным в ООО «СГНПК». При проведении работ АДНМЭ ток в питающей линии достигает 500-700 А. Ток такой величины необходим для создания достаточного по амплитуде ЭМ отклика среды, регистрируемого измерительной аппаратурой.

Заземления источника тока осуществляются с помощью графитопластовых электродов, выполненных в форме труб. Контакт питающего кабеля, во избежание его электрохимического и температурного разрушения, выполняется внутри труб, где напряженность поля практически равна нулю.

Для одновременной регистрации ЭМ данных на нескольких измерительных линиях используется многоканальный измеритель разности потенциалов геофизический (ИРПГ), с числом каналов от 6 до 24, разработанный и изготовленный совместно ООО «СГНПК» и НПК «Сибгеосистемы». Входная схема аналоговых сигналов реализована так, что каждый второй канал является дифференциальным. Использование трёхэлектродной измерительной линии $X_k-X_m-X_n$ и дифференциального канала в измерительной аппаратуре позволяет подавлять синфазные помехи, одновременно проявляющиеся и на линии X_kX_m , и на линии X_mX_n , и измерять малые величины второй конечной разности потенциалов Δ^2U .

Измерение ЭМ сигнала проводится как во время пропускания тока, так и во время переходного процесса. Время импульса и время измерения переходного процесса меняется от 4 до 12 с. При частоте дискретизации 2 или 4 кГц во время одного импульса и одного переходного процесса выборка значений ЭМ поля по одному каналу составляет от 9000 до 54000 отсчётов АЦП. Такой поток данных записывается на измерительной станции и дублируется на резервном хранилище данных для исключения потери информации в случае возникновения нештатных ситуаций.

Измерения на акваториях в движении связаны с проявлением особого вида ЭМ помех, связанных с волнением моря и движения измерительных электродов в магнитном поле Земли. Различные технические приёмы, использующиеся в АДНМЭ, позволяют уменьшить влияние таких помех. Погружение измерительной части косы вглубь водной толщи значительно уменьшает влияние морских волн, так же снижается воздействие теллурической активности.

Во время съёмки проводится сбор большого количества дополняющей ЭМ измерения информации о позиции судна и косы, глубины моря – эти данные составляют поток т.н. телеметрической информации, которую обрабатывают и привязывают к ЭМ данным.

Измеряемые величины и трансформанты ЭМ поля, применяющиеся в АДНМЭ

Режим работы источника – разнополярные прямоугольные импульсы с паузой (Рис. 3). Режим измерений – запись сигнала во время пропускания тока и во время переходного процесса (Рис. 3). Измерительными линиями осуществляется измерение разности потенциалов (ΔU), второй конечной разности потенциалов (Δ^2U), сигнала переходного процесса ($\Delta U(t)$) и второй конечной разности сигнала переходного процесса ($\Delta^2U(t)$) (Рис. 4а). На основании таких измерений рассчитывается ряд трансформант ЭМ поля ($DU(t)$, $D^2U(t)$, $P1(t)$, $D\varphi(t)$, $Ps(t)$), в которых по-разному проявляются составляющие переходного процесса, связанные со становлением ЭМ поля в проводящей среде и вызванной поляризацией геологической среды.

$$DU(t) = \frac{\Delta U(t)}{\Delta U} \quad (1)$$

$$D^2U(t) = \frac{\Delta^2U(t)}{\Delta^2U} \quad (2)$$

$$P1(t) = \frac{\Delta^2U(t)}{\Delta U(t)} \quad (3)$$

$$D\varphi(t) = \frac{\partial \Delta^2U(t) / \partial t}{\partial \Delta U(t) / \partial t} - P1(t) \quad (4)$$

$$Ps(t) = \frac{\Delta^2 U(t) - \Delta^2 U}{\Delta U(t) - \Delta U} \quad (5)$$

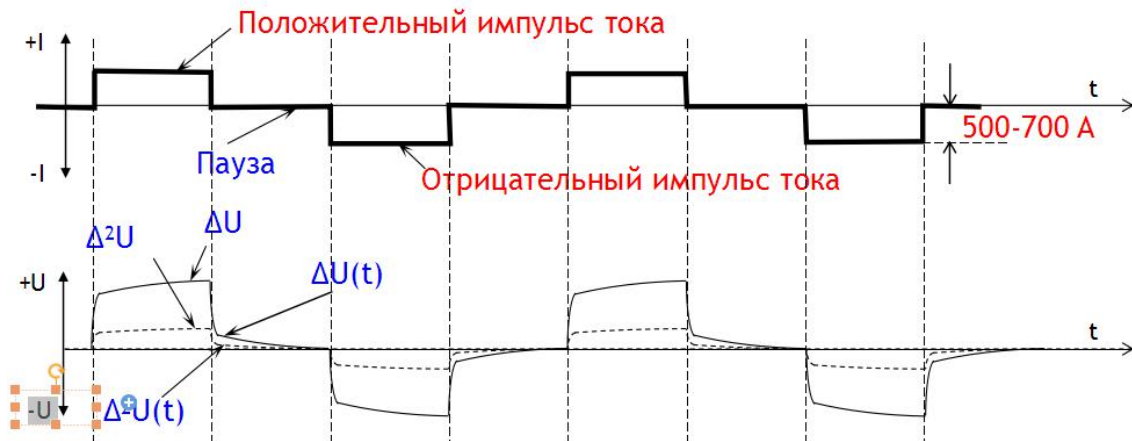


Рисунок 3. Сигнал источника (AB) и сигналы, регистрируемые на одной измерительной линии установки АДНМЭ (Xk-Xm-Xn).

Трансформанты $DU(t)$ и $D^2U(t)$ (Рис. 4б) определяются всеми составляющими переходного процесса без ослабления какой-либо из них. Сигнал переходного процесса и вторая конечная разность сигнала переходного процесса нормируются на разность потенциалов и вторую конечную разность потенциалов во время пропускания тока соответственно, делая величины независимыми от силы тока источника. Для неполяризующейся среды спады $DU(t)$ и $D^2U(t)$ описываются степенной функцией времени и быстро уменьшаются во время поздней стадии переходного процесса. Спад $D^2U(t)$ происходит быстрее и связан с уменьшением пространственной дифференциации ЭМ поля становления. Для поляризующейся среды спады этих величин имеют другой характер, определяющийся свойствами поляризующейся среды.

Трансформанта $P1(t)$ (Рис. 4в) в поздней стадии переходного процесса уменьшает проявление становления ЭМ поля в трансформированном сигнале переходного процесса. Для неполяризующейся среды по мере уменьшения пространственной дифференциации поля становления $P1$ стремится к нулевым значениям. Для поляризующейся среды на трансформанте появляется восходящая ветвь и выход на асимптоту в поздней стадии переходного процесса.

Для неполяризующейся среды трансформанта $D\phi(t)$ в поздней стадии переходного процесса так же стремится к нулевым значениям. Для поляризующейся среды в значениях трансформанты $D\phi(t)$ (Рис. 4в) присутствуют положительные и отрицательные значения. Переход через 0 происходит, когда скорость спада второй конечной разности сигнала переходного процесса ($\partial \Delta^2 U(t) / \partial t$) начинает определяться вызванной поляризацией, а не становлением ЭМ поля.

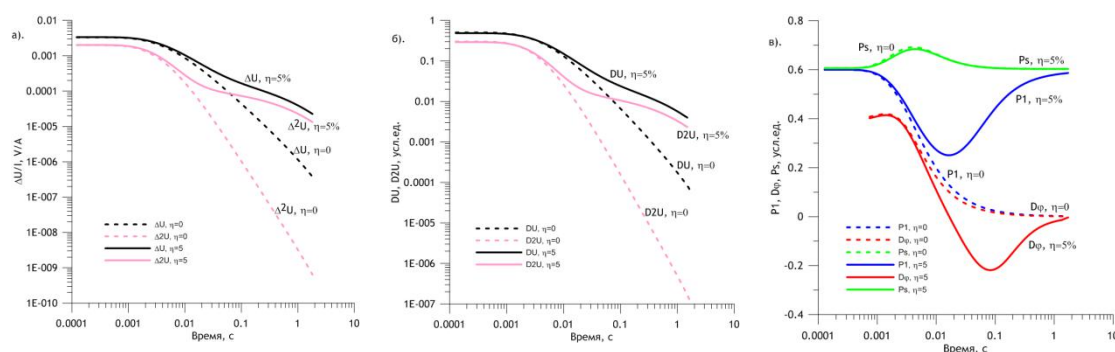


Рисунок 4. Измеряемые сигналы ($\Delta U(t)$ и $\Delta^2 U(t)$) и трансформанты ($DU(t)$, $D^2 U(t)$, $P1(t)$, $Dp(t)$, $Ps(t)$), рассчитанные на трёхэлектродной измерительной линии для неполяризуемой ($\eta=0$) и поляризуемой ($\eta=5\%$) среды.

Разницы в поведении трансформанты $Ps(t)$ над неполяризуемой и поляризуемой средой не возникает (Рис. 4в). В поздней стадии переходного процесса трансформанта определяется отношением разности потенциалов ΔU и второй конечной разности потенциалов $\Delta^2 U$ во время пропускания тока.

Для определения распределения с глубиной УЭС и характеристик ВП (при описании частотной дисперсии сопротивления формулой Коула-Коула – это поляризуемость (η), время релаксации (τ) и показатель степени (c)) – проводят совместную инверсию трансформант для проводящей поляризуемой среды.

Дифференциация геологической среды по таким геоэлектрическим характеристикам позволяет выделять проводящие и высокоомные породы и поляризующиеся объекты (ореолы вторичной сульфидизации, связанные с УВ, ММП).

Непрерывные дипольные электромагнитные зондирования (НДЭМЗ) для решения инженерно-геологических задач

Акваторные инженерно-геологические работы сопровождают освоение шельфа морей. Для изучения условий прокладки коммуникаций и исключения случаев аварий при бурении скважин и загрязнения морской среды сейчас активно привлекаются электроразведочные методы.

Перед разрабатываемой методикой электроразведочных исследований ставились задачи горизонтального и вертикального изучения геоэлектрической среды: определение кровли и подошвы ММП, выделение области распространения криопэгов, изменение мощности глинистых и песчаных разностей.

Принципы, которыми руководствовались при проектировании методики: реализация непрерывных измерений в движении; оптимизация установки для буксирования судном; выбор оптимальных режимов работы питающей и приёмной аппаратуры для решения геологических задач; создание достаточного уровня измеряемого сигнала для получения качественного материала.

Основываясь на опыте нефтегазопроисловых электроразведочных работ с буксируемой косой была избрана установка с заземлённой электрической линией (ЗЭЛ) для возбуждения

геоэлектрической среды и ряд ЗЭЛ для одновременной регистрации отклика с различных эффективных глубин, как во время пропускания тока, так и во время переходного процесса.

С точки зрения конструкции буксируемой косы, технологичной является установка с измерительными линиями, находящимися в осевой области источника (диполь-дипольная или потенциальная установка). Такую линию можно изготовить в виде непрерывной косы с выводами электродов, в начале – питающих, за ними – измерительных. Аналогичные буксируемые косы используются при проведении нефтегазописковых работ АДНМЭ. Электроразведочная коса состоит из комбинированного кабель-троса, имеющего генераторный и измерительный участки. Конструкция питающей части косы такова, что внутри силовых линий, выполненной в виде специализированного коаксиального кабеля, проходят измерительные проводники. К участку питающей линии присоединена приёмная линия на которой имеется несколько выводов измерительных электродов (Рис. 5).

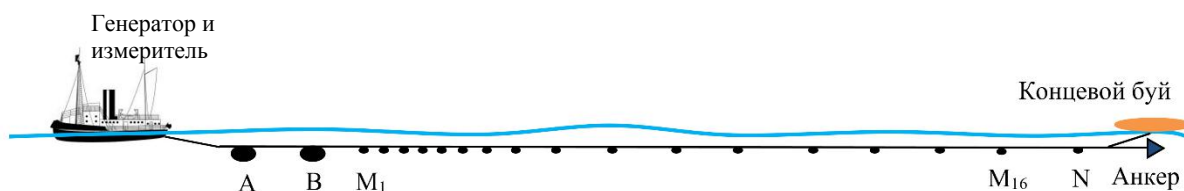


Рисунок 5. Установка НДЭМЗ для решения инженерно-геологических задач.

Режим работы питающей и измерительной аппаратуры – разнополярные прямоугольные импульсы, разделённые измерительной паузой. Непрерывная регистрация сигнала на постоянном токе и во время переходных процессов позволяет получать отклик как до кровли ММП, так и ниже подошвы и дифференцировать геоэлектрическую среду, находящуюся ниже морской толщи, как по латерали, так и по вертикали. Измеряемый сигнал несёт информацию о проводящих свойствах среды и о её поляризационных свойствах, поэтому при его инверсии обязателен учёт частотной дисперсии сопротивления.

Проведение совместных измерений на постоянном токе и во время переходного процесса даёт возможность изучать распределение УЭС геологической среды, начиная с морского дна до глубин 300–500 м. Отклик на постоянном токе хорошо дифференцирует ВЧР по латерали и позволяет надёжно определять удельное сопротивление верхнего слоя путём прямых измерений, а также в реальном времени получать кривые зондирования на постоянном токе для проведения качественной интерпретации и контроля работоспособности аппаратуры. Сигнал становления проникает под высокоомные покровы до больших глубин, в нём проявляются проводящие и поляризующиеся объекты.

Для измерений используется модульная аппаратура, разработанная ООО «СГНПК» и НПК «Сибгеосистемы», каждый модуль которой позволяет регистрировать сигнал на 4-х каналах. Общее число каналов от 16 до 24. В измерителях применяются 32-х разрядные $\Delta\Sigma$ АЦП.

Большое число выводов измерительных электродов позволяет их коммутировать в различные установки с разными разносами.

Практическое использование АДНМЭ и АДНМЭ с ПБС

За, более чем, 15-лет практического использования АДНМЭ и АДНМЭ с ПБС выполнен значительный объём съёмки в разных геологических и климатических условиях (Рис. 6).



Рисунок 6. Обзорная карта морских работ АДНМЭ и АДНМЭ с ПБС.

Один из примеров выделения аномалии ВП, связанной со вторичной сульфидизацией пород возникшей под воздействием залежи УВ – результаты съёмки АДНМЭ на Северо-Гуляевском месторождении в Баренцевом море (Рис. 7).

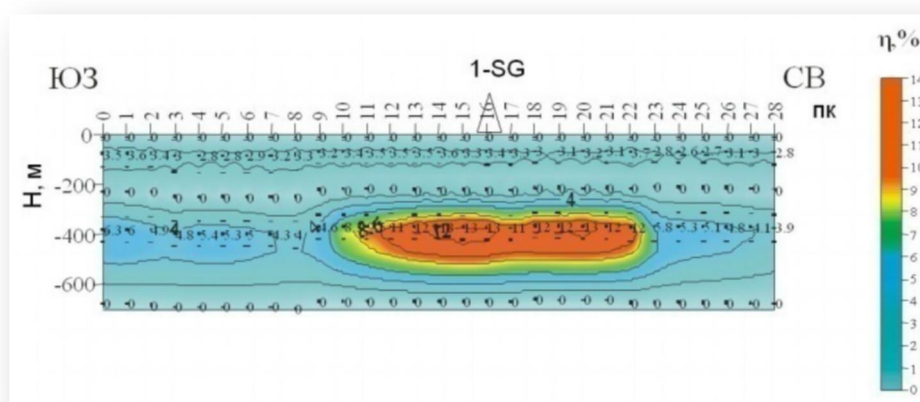


Рисунок 7. Выделение аномалии ВП над залежью УВ на геoeлектрическом разрезе распределения коэффициента поляризуемости (на примере Северо-Гуляевского месторождения в Баренцевом море).

Выводы

Показаны конкурентные преимущества АДНМЭ при проведении нефтегазопроисловых работ, влияющие на точность определения геoeлектрических характеристик среды, и, как следствие, на точность осуществления геологического прогноза; а также на мобильность, технологичность и скорость проведения электроразведочных работ.

Измерение характеристики поля переходного процесса, которая различается для диффузионного поля становления и градиентного поля ВП, позволяет формировать трансформанты для ослабления проявления либо становления, либо ВП. Проведение совместной инверсии трансформант, в которых по-разному проявляется становление и ВП, снижает эквивалентности между геоэлектрическими параметрами и тем самым позволяет получить более точную оценку распределения проводящих и поляризационных свойств геоэлектрической модели.

Технологически АДНМЭ реализованы как измерения в движении с буксируемой косой в модификациях, позволяющих проводить измерения при малых (10-15 м) и больших (до 1000 м) глубинах моря, что существенно расширяет территориальные возможности его применения.

Полученный, более чем 15-летний, опыт работ АДНМЭ в разных геологических и климатических условиях демонстрирует высокий коэффициент связи аномалий ВП с нефтегазовыми залежами, что позволяет использовать его в качестве надёжного сейсмического метода по обнаружению залежей УВ.

Разработанный метод для решения инженерно-геологических задач – НДЭМЗ, позволяет осуществлять латеральную и вертикальную дифференциацию донных отложений на глубины до 300-500 м с целью определения кровли и подошвы ММП, выделения области распространения криопэгов, участков развития «газовых карманов», изменения мощности глинистых и песчанистых отложений и др. геологических задач.

Библиография

Богданов А.Г., Кобзарев Г.Ю., Делия С.В., Зеленцов В.В, Иванов С.А., Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М. [2004] Опыт применения и геологические результаты работ дифференциальным нормированным методом электроразведки на российской акватории Каспийского моря. Геофизика, 5, 38–41.

Колесов В.В., Вовк В.С., Дзюбло А.Д., Кудрявцева Е.О. [2008] Разведка и обустройство месторождений в прибрежной зоне Обской губы. Газовая промышленность, 12, 66–68.

Ситников А.А., Агеенков Е.В., Иванов С.А., Жуган П.П., Мальцев С.Х. [2017] Аппаратура, устройства и системы наблюдений для решения нефтегазописковых и инженерно-геологических задач дифференциально-нормированным методом электроразведки (ДНМЭ) на акваториях. Приборы и системы разведочной геофизики, 2, 34–41.

Veeken P., Legeydo P., Pesterev I., Davidenko Y., Kudryavceva E. and Ivanov S. [2009] Geoelectric modelling with separation between electromagnetic and induced polarization field components. First Break, 27, 53–64.

Veeken, P., Legeydo, P., Davidenko, Y., Kudryavceva, E., Ivanov, S. and Chuvaev A. [2009] Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration. Geophysics, 74, 47-59.

References

Bogdanov A.G, Kobzarev G.Yu., Deliya S.V., Zelentsov V.V., Ivanov S.A., Legeydo P.Yu., Mandelbaum M.M. [2004] Oпит primeneniya I geologicheskie rezultaty rabot differentsialnim normirovannim metodom electrorazvedki na rossiyscoy akvatorii Kaspiyskogo morya [The experience of application and the geological work results by the differential standardized method of electrical exploration in the Russian waters of the Caspian Sea]. Geophysics, 5, 38–41 (In russian).

Kolesov V.V., Vovk V.S., Dzublo A.D., Kudryavceva E.O. [2008] Razvedka I obustroystvo mestorozhdeniy v pribrezhnoy zone Obskoy Gubi [Exploration and development of deposits in the coastal zone of the Obsskiy Gulf]. Gas industry, 12, 66–68 (In russian).

Sitnikov A.A., Ageenkov E.V., Ivanov S.A., Zhugan P.P., Maltsev S.H. [2017] Apparatura, ustroystva I systemi nabludeniy dly resheniya neftegazoposkovikh I inzhenerno-geologicheskikh zadach differentsialno normirovannim metodom electrorazvedki (DNME) na akvatoryakh [Equipment, devices and observation systems for solving oil and gas exploration and geotechnical problems by the differential-normalized method of electrical prospecting (DNME) on off-shore]. Instruments and systems for exploration geophysics, 2, 34–41 (In russian).

Veeken P., Legeydo P., Pesterev I., Davidenko Y., Kudryavceva E. and Ivanov S. [2009] Geoelectric modelling with separation between electromagnetic and induced polarization field components. First Break, 27, 53–64.

Veeken, P., Legeydo, P., Davidenko, Y., Kudryavceva, E., Ivanov, S. and Chuvaev A. [2009] Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration. Geophysics, 74, 47-59.