

Аппаратура, устройства и системы наблюдений для решения нефтегазопроисловых и инженерно-геологических задач на акваториях электроразведочными методами ДНМЭ и НДЭМЗ

- Ситников А.А., Иванов С.А., к.г.-м.н., Жуган П.П., Мальцев С.Х., ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания», (ООО «СГНПК»),
- Агеенков Е.В., к.г.-м.н., ООО «СГНПК», Иркутский национальный исследовательский технический университет

Введение

Морские электрометрические исследования были впервые проведены в 1931 г. на Каспии в бухте Ильича около Баку. 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 [Морские ..., 1977]. В 1951 г. они были возобновлены на Каспийском море у побережья Азербайджана и Дагестана. В 1954–1959 гг. на основе дипольных установок, предложенных Л.М. Альпным, были разработаны и внедрены методы непрерывных дипольно-осевых зондирования и непрерывного профилирования с повышенной глубиной исследования [Назаренко, 1957]. 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 зондирования (НДОЗ); 2) метод непрерывного профилирования (НП); 3) метод зондирования становлением магнитного поля (ЗСМ); 4) метод вызванной поляризации (ВП) [Морские ..., 1977]. При проведении измерений на постоянном токе использовались установки, измерительные и питающие электроды которых размещались на дне (донные установки) [Ваньян, 1956; Терёхин, 1958].

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 во время движения судна, использовать мощные источники питания и большие измерительные и питающие линии, транспортировка которых не вызывает трудностей. Выдержанность сопротивления 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 нём, приводят к появлению дополнительных помех [Морские ..., 1977].

Современные представления о физико-геологической модели (ФГМ) нефтегазового месторождения дают основания для использования методов, изучающих ВП на глубинах до 1000 м [Schumacher, 1996; Моисеев, 2002]. ДНМЭ, позволяющий совместно изучать индукционные и поляризационные процессы, зарекомендовал себя при поисках УВ в условиях суши [Легайдо, 1990, 1995, 1998] и был адаптирован для условий акваторий. Основная задача ДНМЭ заключается в выделении аномалий ВП, связанных с

залежами углеводородов, на основании изучения переходного процесса от гальванически заземлённой электрической линии (ГЗЭЛ).

1. Особенности морской технологии ДНМЭ и решаемые задачи

Технология морских ДНМЭ, как и сухопутных, основана на возбуждении индукционных и поляризационных процессов ГЗЭЛ (АВ) и измерении сигнала, вызванного становлением ЭМ поля и релаксацией ВП, в осевой зоне источника трёхэлектродной ГЗЭЛ (МОН). При проведении съёмки на акваториях в технологии ДНМЭ применяется установка с несколькими измерительными линиями, расположенными на разных расстояниях от источника. Такая установка позволяет проводить ЭМ зондирования и зондирования ВП [Агеев, 2006].

Измерения в осевой зоне источника предполагают одинаковый знак поля во время пропускания тока, индукционного переходного процесса и поляризационного релаксационного процесса, вызванного гальваническим током [Моисеев, 2002]. Глубинность распространения гальванического тока, а значит и исследования ВП, можно оценить по расстоянию между центрами источника и приёмника (r) как для дипольной осевой электрической

установки. Эффективная глубина исследования будет составлять $r/2$.

Установка с несколькими разносами позволяет изучать распределение УЭС до глубин 3000 – 4000 м, обнаруживать аномалии ВП на глубинах до 1000 м, выделять из них аномалии, связанные с залежами УВ, а также попутно картировать зоны распространения ММП и газогидратов.

Для увеличения производительности работ измерения ДНМЭ проводятся в движении погружённой в водный слой буксируемой косой [Богданов, 2004; Колесов, 2008; Veeken, 2009a, 2009b]. Статистическое улучшение соотношения сигнал/шум проводится совместной обработкой переходных процессов на некотором интервале линии съёмки, с использованием т.н. пространственного осреднения сигнала. Осреднённые результаты измерений относятся к середине интервала осреднения.

Трёхэлектродные измерительные линии используются для одновременной регистрации разности потенциалов (ΔU) и второй конечной разности потенциалов ($\Delta^2 U$) на нескольких разносах как на постоянном токе (ΔU и $\Delta^2 U$), так и во время переходного процесса ($\Delta U(t)$ и $\Delta^2 U(t)$) (Табл.1). Параметр $\Delta^2 U$ связан с пространственной неоднородностью ЭМ

▼ Табл. 1. Измеряемые, инвертируемые и интерпретируемые параметры для разных видов съёмки.

Вид съёмки	Измеряемые параметры	Инвертируемые параметры – трансформанты	Интерпретируемые параметры
Морской ДНМЭ для поисков УВ и попутного решения инженерно-геологических задач	$\Delta U(r); \Delta^2 U(r);$ $\Delta U(t,r); \Delta^2 U(t,r)$	$DU(t,r)=\Delta U(t,r)/\Delta U(r);$ $D^2U(t,r)=\Delta^2 U(t,r)/\Delta U(r);$ $P1(t,r)=D^2U(t,r)/DU(t,r);$ $Ps(t,r)=(D^2U(t,r)-\Delta^2 U(r))/(DU(t,r)-\Delta U(r));$ $D\phi s(t,r)=(\partial D^2U(t,r)/\partial t)/(\partial DU(t,r)/\partial t)-Ps(t,r)$	$\rho(h), \eta(h), \tau(h),$ $c(h)$
Акваторные НДЭМЗ для ИГР	$\Delta U(r); \Delta U(t,r)$	$\Delta U(r); \Delta U(t,r);$ $\rho_k(r)=k(r)\Delta U(r)/I;$ $\rho_r(r)=k(t,r)\Delta U(t,r)/I$	$\rho(h), \eta(h), \tau(h),$ $c(h)$

поля и позволяет формировать трансформанты ($P1(t,r)$ и $Dfs(t,r)$), эффективно подавляющие индукционную составляющую сигнала переходного процесса в поздней стадии и подчёркивающие информацию о поляризуемости среды.

Использование MON и дифференциального канала в измерительной аппаратуре позволяет подавлять синфазные помехи, одновременно проявляющиеся и на линии МО, и на линии ON, и измерять малые величины второй конечной разности потенциалов $\Delta^2 U$.

Работы проводятся специализированной электроразведочной косой, выполненной из комбинированного кабель-троса, имеющего питающий и измерительный участки. Кабель косы практически не растяжим 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 оплетки проходят проводники приёмной линии. Силовые жилы имеют необходимое сечение для прохождения

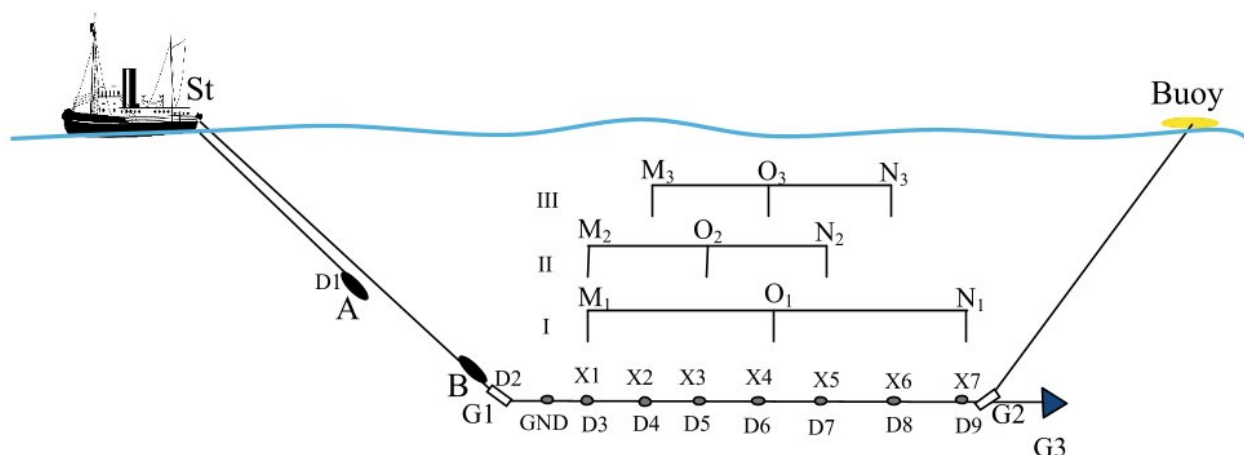
большого тока. Общая длина косы около 2500 м. Длина питающей линии на косе – около 950 м. С целью уменьшения влияния судна на регистрируемый сигнал силовой электрод А выносится за корму не менее чем на 50 м.

Приемные электроды выполнены из неполяризующегося проводника. Длина электрода составляет около 2 м. Разности потенциалов измеряются относительно электрода GND (земля), отнесённого от электрода X1 в сторону кормы примерно на 50 м.

Перед полевыми исследованиями выполняется моделирование, т.е. определяется оптимальная конфигурация косы для ее стабильного движения в водном слое на нужной глубине для получения качественных данных в конкретных физико-геологических условиях.

Коса на участке питающий электрод В – приёмный электрод X7 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

▼ Рис. 1. Описание системы генерации – приёма ЭМ сигнала с тремя измерительными линиями (MON) (I, II, III). Обозначения: St – корма; А, В – питающие электроды; D1 – D9 – датчики глубины; GND – электрод «земля»; X1 – X7 – измерительные электроды; G1 – головной заглубитель, G2 – концевой заглубитель; G3 – гидродинамический натяжитель; Buoy – концевой буй с радио трекером.



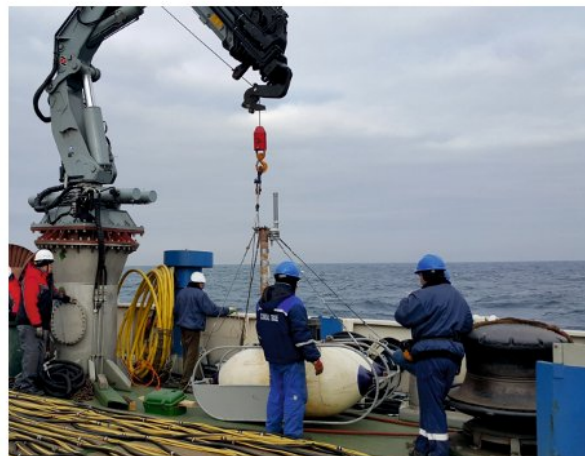
электродов А и В и на измерительной части косы. Она завершается буксировочным участком, на конце которого закреплён буй (Рис. 2), движущийся по поверхности моря. Он частично выполняет функцию стабилизации всей косы, а также несёт на себе радио трекер с приёмником сигнала спутниковой навигации. Это устройство разработано в 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 подводящих кабелей к электродам силовой установки. Разнополярные импульсы с измерительной паузой коммутируются тиристорным ключом, разработанным в ООО «СГНПК». При проведении работ ДНМЭ ток в питающей линии достигает 500 А.

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 18, разработанный и изготовленный совместно ООО «СГНПК» и НПК «Сибгеосистемы». Входная схема аналоговых сигналов реализована так, что каждый второй канал является дифференциальным. Величина входного напряжения ± 4.5



▲ Рис. 2. Спуск концевого буя с радио трекером на воду.

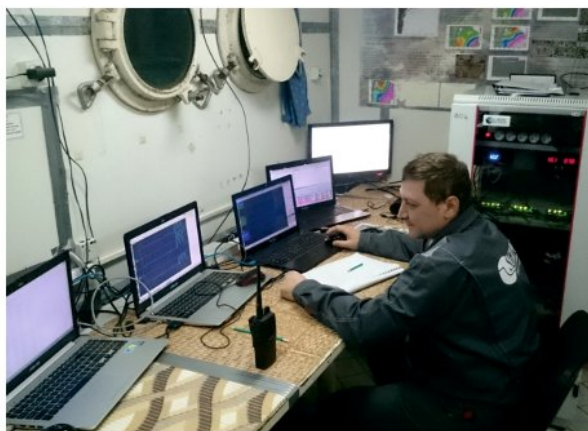
В (при коэффициенте усиления (КУС), равном 1). Реализовано программное управление КУС: входной сигнал может быть увеличен в 2, 4, 8, 16, 64 и 128 раз. Шаг дискретизации при оцифровке сигнала 0.5 мс или 0.25 мс (2000 или 4000 отсчётов в секунду). Для оцифровки используется 24-х или 32-х разрядные аналогово-цифровые преобразователи (АЦП), а для компенсации изменения потенциала измерительных электродов используется 16 разрядный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Входное сопротивление устройства (на постоянном токе не менее 100 МОм) исключает сквозные низкочастотные токи от заземления до входа прибора. Модуль позволяет регистрировать сигнал в большом динамическом диапазоне – 108 или 130 дБ, в зависимости от разрядности АЦП.

Измерения ЭМ сигнала проводятся как во время пропускания тока, так и во время переходного процесса. Они начинаются в конце токового импульса, за $1/8$ его длительности до момента выключения тока в линии, и продолжаются во время переходного процесса до следующего включения тока. 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 движением измерительных электродов в магнитном поле Земли. Различные технические приёмы, использующиеся в ДНМЭ, позволяют уменьшить влияние таких помех. Погружение измерительной части косы вглубь водной толщи значительно уменьшает влияние морских волн, а также снижает воздействие теллурической активности.

Во время съёмки проводится измерение большого количества информации о позиции судна и косы (Рис. 3), а также глубине моря. Эти данные составляют поток т.н. телеметрической информации, которую необходимо собрать, обработать и привязать к ЭМ данным.



▲ Рис. 3. Измерительная лаборатория на судне.

2. НДЭМЗ – электроразведочная технология для АИГР

Акваторные ИГР 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.

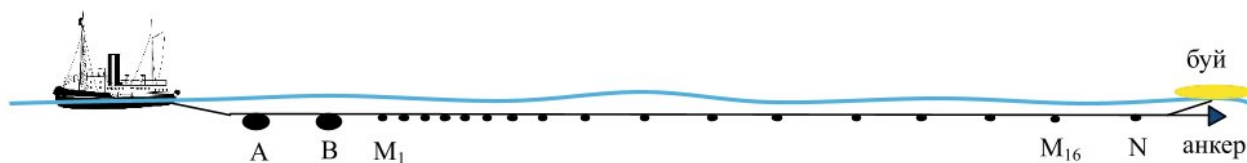
При разработке методики электроразведочных исследований для инженерно-геологических работ ставились задачи горизонтального и вертикального изучения геоэлектрической среды при выполнении следующих принципов: определение кровли и подошвы ММП, выделение области распространения криопэгов, изменения мощности глинистых и песчаных разностей.

- 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 нефтегазописковых электроразведочных работ с буксируемой косой, была избрана установка с ГЗЭЛ для возбуждения геоэлектрической среды и ряд ГЗЭЛ для одновременной регистрации отклика с различных эффективных глубин, как во время пропускания тока, так и во время переходного процесса.

Наиболее технологичной установкой, с точки зрения конструкции буксируемой косы, является диполь-дипольная. Такую линию можно изготовить в виде непрерывной косы с выводами электродов, вначале питающих, затем – измерительных. Аналогичные буксируемые косы используются при проведении нефтегазописковых работ ДНМЭ.

Проведение совместных измерений на постоянном токе и во время переходного процесса позволяет изучать распределение УЭС геологической среды, начиная с



▲ Рис. 4. Установка непрерывных дипольных электромагнитных зондирований (НДЭМЗ).

морского дна до глубин 300–500 м. Отклик на постоянном токе хорошо дифференцирует ВЧР по горизонтали и позволяет надёжно определять удельное сопротивление верхнего слоя путём прямых измерений. Он так же позволяет быстро (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. Также в нём проявляются 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.

Такая установка и измерительная аппаратура позволяют решать ряд инженерно-геологических задач – горизонтальное и вертикальное изучение геоэлектрической среды: определение кровли и подошвы ММП, выделение области распространения криопэгов, изменение мощности глинистых и песчаных разностей.

3. Практические примеры использования ДНМЭ на акваториях (работы на акватории Северного и Среднего Каспия)

Большой объём морских измерений ДНМЭ выполнен на акватории Каспийского моря. Начиная с 2003 г. ООО «СГНПК»

проводит нефтегазопроисковые работы в российском и казахстанском секторе Северного и Среднего Каспия.

Геологоразведочные работы (ГРР) в условиях Северного Каспия связаны со сложными природными и геологическими условиями [Алексеев, 2009].

При подготовке Южно-Ракушечной площади ведущую роль сыграли методы прямого прогноза УВ-насыщения – электроразведочные работы ДНМЭ, прогнозирование коллекторов и УВ-насыщения по технологии AVO-литоскан. Электроразведочные работы с высокой степенью надёжности выявили мощную аномалию, связанную с наличием залежи в юрско-меловых отложениях, а проведенный AVO-анализ позволил охарактеризовать интервал неокосских отложений в районе скважины №2-Ракушечная как обладающий хорошими коллекторскими свойствами и высокими перспективами углеводородного насыщения. В результате испытания скважины максимальный дебит из отложений неокоса на 25 мм штуцере составил более 1000 м³/сут, а извлекаемые запасы нефти составили 215 млн. тонн (C1+C2), а газа - 28 млрд. м³ [Там же].

На основании анализа проведённых работ разработан оптимальный комплекс на поисково-оценочном этапе ГРР, включающий в качестве основных следующие методы: сейсморазведку МОГТ-2Д, электроразведку ДНМЭ, прогнозирование коллекторов и УВ-насыщения по технологии AVO-литоскан, бурение, ГИС, ВСП. В результате применения этого комплекса методов эффективность бурения

ния составила 90% [Там же]. Были подготовлены к бурению структуры со сложными условиями опосредования, а также структуры, где глубина моря превышает 45 м, а предполагаемая глубина скважин более 5000 м.

4. Работа с клиентами

Подготовка к полевым измерениям проводится совместно с Заказчиком. На основе априорной информации строится ФГМ района работ и проводится численное моделирование сигнала ДНМЭ для различных режимов работы аппаратуры.

После проведения моделирования определяется несколько наборов параметров съёмки и сети наблюдений для решения поставленных задач. Все они предлагаются Заказчику с пояснениями положительных и отрицательных сторон каждого набора.

Совместно с Заказчиком определяются оптимальные параметры съёмки и сети наблюдений.

5. Опыт работы в разных регионах

Удобное расположение базы ООО «СГНПК» — в центре самого большого континента и, практически, равное удаление от акваторий его морей и возможность установки оборудования и выполнения работ на судах различного типа — позволяют оперативно проводить полевые работы на водах всех морей РФ и за её пределами.

Эффективность метода ДНМЭ в уменьшении рисков бурения нефтегазопоскоковых скважин была продемонстрирована на акваториях российских и зарубежных морей (казахстанский сектор Каспийского моря, Северное, Норвежское и Баренцево моря, румынский сектор Чёрного моря).

По данным Моргеобанка большая часть электроразведочных работ на акватории российских морей была выпол-

нена по технологии ДНМЭ. В Морском филиале Российского федерального геологического фонда находится 2880 геологических отчетов. Из них только 55 включают данные по электроразведке (<http://marine.rfgf.ru>). Период написания этих отчетов 1963–2014 гг. Начиная с 2002 г. в Морской филиал начинают поступать отчеты по работам ДНМЭ, выполненным сотрудниками компании ООО «СГНПК», созданной в 2003 г. (в 2002 г. коллектив относился к ДГУП «Сибирская геофизическая партия» ГФУГП «Иркутскгеофизика»). Начиная с этого времени, процент отчетов по работам ДНМЭ составляет 74% от общего объема электроразведочных работ. Общий объем работ ДНМЭ в российском секторе за 2002–2016 гг. составляет более 15 000 пог. км.

Заключение

Представленные аппаратура, устройства, системы наблюдений и в целом методика ДНМЭ разработаны коллективом ООО «СГНПК». Некоторые аппаратурные, программные и методические вопросы решаются в сотрудничестве с ведущими научными и производственными организациями РФ.

Многолетний практический опыт показал, что методика ДНМЭ эффективна при решении задачи снижения рисков бурения нефтегазопоскоковых скважин для большинства геолого-геофизических условий на суше и акваториях.

Разрабатываемая аквальная методика НДЭМЗ для АИГР призвана решать задачи исследования геоэлектрического разреза начиная с морского дна до глубин 300–500 м.

Выполняя сухопутные и морские электроразведочные работы для нефтегазовых и изыскательских компаний, ООО «СГНПК» снижает финансовые и экологические риски.

Литература

1. Агеев, В.В. Изучение вызванной поляризации в широком диапазоне времен (ВП-Ш) / В.В. Агеев, Б.С. Светов, А.С. Амиантов // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2006. – №2. – С.1–3.
2. Алексеев, А.Г. Оптимизация комплекса геологоразведочных работ на нефть и газ в Северном Каспии / А.Г. Алексеев. Автореф. дисс. на соискание ученой степени к. г.-м. н. – Ростов-на-Дону, 2009. – 26 с.
3. Опыт применения и геологические результаты работ дифференциальным нормированным методом электроразведки на российской акватории Каспийского моря / А.Г. Богданов, Г.Ю. Кобзарев, С.В. Делия и др. // Геофизика. – 2004. – №5. – С.38–41.
4. Ваньян Л.Л. О теоретических кривых морского электрического зондирования донной установкой / Л.Л. Ваньян // Прикладная геофизика. – 1956. – Вып. 15. – С.83–90.
5. Колесов, В.В. Разведка и обустройство месторождений в прибрежной зоне Обской губы / В.В. Колесов, В.С. Вовк, А.Д. Дзюбло, Е.О. Кудрявцева // Газовая промышленность. – 2008. – №12. – С.66–68.
6. Легейдо, П.Ю. Применение дифференциально-нормированной электроразведки на Непском свде / П.Ю. Легейдо, М.М. Мандельбаум, Н.И. Рыхлинский // Геология и геофизика. – 1990–№4.
7. Легейдо, П.Ю. Дифференциально-нормированный метод электроразведки при прямых поисках залежей углеводородов / Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. // Геофизика. – 4 – 1995. – С.42–45.
8. Легейдо, П.Ю. Теория и технология дифференциально-нормированной геоэлектроразведки для изучения поляризующихся разрезов в нефтегазовой геофизике / П.Ю. Легейдо. Дис. на соиск. уч. ст. д. г.-м. н.. – Иркутск. : ИрГТУ, – 1998. – 198 с.
9. Моисеев, В.С. Метод вызванной поляризации при поисках нефтеперспективных площадей / В.С. Моисеев. – Новосибирск : Наука, 2002. – 135 с.
10. Морские геофизические исследования / Я.П. Маловицкий, А.А. Ггельганц, Л.И. Коган и др. – М. : Недра, – 1977. – 375 с.
11. Назаренко, О.В. Методика непрерывных морских электрических зондирований / О.В. Назаренко // Геология нефти и газа. – 1957. – №8. – С. 40–45.
12. Терёхин, Е.И. Теоретические основы электрического зондирования с установкой, погружённой в воду / Е.И. Терёхин // Прикладная геофизика. – 1958. – Вып. 18. – С.78–102.
13. Schumacher, D. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments / D. Schumacher, M.A. Abrams // Hydrocarbon migration and its nearsurface expression: AAPG Memoir 66. – 1996. – P.71–89.
14. Veeken P., Legeydo P., Pesterev I., Davidenko Y., Kudryavceva E. and Ivanov S. Geoelectric modelling with separation between electromagnetic and induced polarization field components / P. Veeken, P. Legeydo, I. Pesterev et al // First break. – 2009 – Vol. 27, December. – P.53–64.
15. Veeken, P. Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration / P. Veeken, P. Legeydo, Y. Davidenko // Geophysics – 2009. – 74. – P.47–59.