

УДК 621.371:550.837.6

## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКА И ОКОНТУРИВАНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ

Д.В. ГОЛОЛОБОВ, П.М. КАТЛЕРОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 19 ноября 2003*

Представлен обзор методов современной электроразведки поиска и выделения границ залежей нефти и газа (углеводородов). Раскрываются тенденции развития методов и аппаратурных решений для их реализации.

*Ключевые слова:* углеводородная залежь, электроразведка, электромагнитная волна, анизотропия.

### Введение

В настоящее время ведущими геофизическими методами поиска и разведки нефти и газа являются сейсморазведочные методы отраженных волн и общей глубинной точки [1], направленные преимущественно на изучение структуры геологического разреза и в меньшей степени на прогноз вещественного состава. Высокая стоимость и недостаточная эффективность, проблемы использования в сложных геологических условиях и определенные неоднозначности при интерпретациях данных методов сейсморазведки приводят к необходимости использования при поисково-разведочных исследованиях на углеводороды (УВ) комплекс методов, включающий грави-, магнито- и электроразведку.

Методы гравитационной и магнитной разведки направлены на регистрацию аномального изменения соответствующих полей на границах углеводородной залежи (УВЗ) и требуют больших материальных затрат.

Задачи электроразведки при прямых поисках месторождений и скоплений УВ направлены не только на геометризацию аномалий типа залежь, но и изучение петрофизических свойств в области УВЗ на глубинах до 5 км.

Теоретически скопления и маломощные залежи с эффективной толщиной, меньшей глубины залегания, не должны выявляться электроразведкой. Однако благодаря изменению сопротивления над залежами УВ и околозалежных пород возможности электроразведки возрастают. Это изменение объясняется миграцией УВ в окружающие залежь породы, кальцитизацией пор и другими факторами, приводящими к изменению (по многим источникам – повышению) сопротивления среды.

Существующие в современной поисковой геофизике модели геологического разреза с включением залежи УВ не дают в полной мере ответа на вопросы, связанные с выделением границ контуров залежей на дневной поверхности и не учитывают взаимодействия УВ и электромагнитной волны (ЭМВ). Как правило, они аппроксимируются полученными экспериментальными данными, что приводит к ограничению их применения на практике.

Электродинамическая модель взаимодействия ЭМВ и среды над залежами УВ, впервые предложенная в [2], позволила на практике реализовать серию методов, основанных на использовании временных, частотных, пространственных параметров и характеристик электродинамических сигналов, обеспечивающих достаточные точность и уровень достоверности определения границ залежей УВ.

Вместе с тем в силу причин, связанных с моделированием процесса взаимодействия залежей УВ и ЭМВ, а также объективного несоответствия моделей реальной геологической ситуации, возможности электроразведки нельзя считать ограниченными.

Интерес к прямым методам электроразведки в последние годы все больше и больше возрастает. И связан он с экологической чистотой методов, их высокой эффективностью, определяемой низким временем аттестации геопланшетов, уровнем достоверности определения контрастных границ, мобильностью измерительной аппаратуры и пр.

### Методы низкочастотных нестационарных полей

**Метод вызванной поляризации (ВП)** [1] основан на изучении вторичных электрических полей, возникающих в Земле под действием электрического тока. Эти поля имеют электрохимическое происхождение, связанное с процессами на контакте твердого вещества гонных пород и внутрипоровой влаги. ВП создается либо импульсами тока постоянной амплитуды, в промежутках между которыми измеряют вторичное поле, либо переменным током различной частоты. При воздействии переменных полей ВП проявляется уменьшением напряжения отклика с ростом частоты или его отрицательным сдвигом фазы относительно возбуждающего тока.

Для описания объемной поляризации пород служит параметр, называемый поляризуемостью  $\eta$ , представляющий собой дипольный момент ВП единицы объема  $M_v$ , приведенный к единице поляризующего поля  $E_n$ . Поляризуемость обычно вычисляют как отношение поля ВП  $E_{ВП}$  к поляризующему полю в конце импульса тока  $E_n$ , измеренных в одной и той же приемной линии:

$$\eta = -M_v / (\varepsilon_0 E_n) = (E_{ВП} / E_n) 100\% , \quad (1)$$

здесь  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума.

Критерием для выделения аномалий ВП является превышение поляризуемости над фоновой, соответствующей поляризуемости окружающих пород. Поляризуемость пород, не содержащих электропроводящих минералов, как правило, не превышает 2 %. Признаком присутствия электропроводящих минералов является превышение кажущейся поляризуемости в два и более раза.

Для многих нефтегазовых месторождений характерны протягивающиеся вверх ореолы, образовавшиеся за счет выделившегося из месторождения сероводорода, что приводит к интенсивным аномалиям ВП.

Метод применяется для картирования и диагностики захоронений отходов по потоку углеводородов, мигрирующих к поверхности Земли за счет процесса гниения [3]. При этом поверхность над захоронением характеризуется аномально низким сопротивлением.

Известна модификация метода, основанная на спектральном анализе измеряемого сигнала [4].

Суть **метода становления поля в ближней зоне (ЗСБ)** заключается в измерении аномального поведения одной из компонент электромагнитного поля, создаваемого протяженным проводником с заданным амплитудным распределением.

В настоящее время в разведке на УВ используются модификации метода, основанные на:

- представлении пластов УВ в виде резонирующих с частотами 2–7 Гц объектов [5];
- использовании вертикального подземного варианта метода, когда поле возбуждается в скважине, а измерения становления поля производят на дневной поверхности [6];

- длительном исследовании возбуждаемого над искусственными залежами УВ поля посредством набора приемников [7];
- применении анализа спектрального состава сигнала [8];
- использовании излучающей рамки, питаемой током 100 А и более, а также двух приемных антенн, разнесенных на расстояние [9].

При этом исследования показывают необходимость повышения точности измерений в условиях существующего поля помех и, как следствие, увеличение соотношения сигнал/шум.

**Инфразвуковая технология АНЧАР** [10] основана на принципе переизлучения. Над залежами углеводородов фиксируются аномалии вследствие возникновения дополнительного к фону потока инфразвуковых волн.

Метод позволяет оперативно определять наличие или отсутствие УВ в геологическом разрезе, основываясь на свойствах и информации, связанных непосредственно с нефтью и газом. Причем, прецедент АНЧАР известен для залежей и нефти, и газа, расположенных и в терригенных, и в карбонатных пластах и коллекторах, при эффективных толщинах от 5-10 м до 1000 м и более, для природных резервуаров и для техногенных скоплений (подземных хранилищ газа), при условиях перекрытия залежей породами различного состава, при глубинах залегания УВ от 0,7 км до 5,0 км.

### **Методы, основанные на изучении естественных полей Земли**

**Метод естественного электрического поля (ЕП)** [1] основан на изучении особенностей локальных проявлений естественных электрических полей, обусловленных возникновением природных электронных проводников, фильтрационными, диффузионно-сорбционными и другими происходящими в Земле процессами.

При реализации метода используют анализ локальных электрохимических, фильтрационных, диффузионных и некоторых других полей.

Наличие электрохимических полей вызвано присутствием в разрезе сульфидных, графитовых и магнетитовых залежей, пластов антрацита, толщ графитизированных, пиритизированных, пирротинизированных и углистых пород. Они образуются также вокруг искусственных подземных проводников, подвергающихся коррозионным процессам.

Причиной образования электрохимических полей являются различия в скачке потенциала на разных участках границы электронной и ионной сред. Ясно, что для создания постоянных во времени полей необходимо, чтобы сохранялись во времени условия, вызывающие различия в изменении потенциала. Электродвижущая сила природных проводников обусловлена изменением химического состава и электрохимических свойств ионной среды или минерального состава пород.

Электрохимические естественные поля на поверхности Земли, как правило, проявляются в виде минимумов потенциала естественного поля (отрицательные аномалии), значения которых в зависимости от характера, размеров, глубин и условий залегания проводника колеблются от единиц до сотен милливольт.

Фильтрационные поля образуются при фильтрации подземных вод в породах. Возвышенности, с которых воды фильтруются в пониженные области, характеризуются отрицательными потенциалами по сравнению с потенциалами в долинах. Величина градиента фильтрационных потенциалов различна в разных условиях и зависит от скорости движения подземных вод, их минерализации, мощности, размеров и глубины залегания подземного потока и других факторов. На практике наблюдаются падения фильтрационных потенциалов до нескольких сотен милливольт на 1 км.

Диффузионные поля возникают вследствие диффузионно-сорбционных процессов, происходящих на участках соприкосновения подземных вод, имеющих различную концентрацию и состав растворенных солей. Характер и интенсивность диффузионных полей зависят также от электрохимических свойств твердых минералов, слагающих среду.

Переменные естественные поля проявляются только в определенных геоморфологических и климатических условиях.

Аномалии собственного потенциала от 20 до 100 мВ зарегистрированы над некоторыми из резервуаров углеводородов, расположенных на территории Албании [11]. При этом измерения на дневной поверхности подтверждены измерениями в скважинах.

К методам на основе эффектов электротеллурических токов относят методы магнитотеллурического зондирования (МТЗ), магнитотеллурического профилирования (МТП), метод теллурических токов (МТТ), магнитовариационного зондирования и профилирования (МВЗ и МВП) [12].

В теоретической основе этих методов лежит модель С.Д. Пирсона, по которой залежь рассматривается в виде источника вертикального электротеллурического тока ("топливного элемента"). Электротеллурический ток, существующий над УВЗ, должен понизить кажущуюся электропроводность пород. В общепринятой теории электромагнитных зондирований влияние "топливного элемента" как внутреннего источника не предусмотрено. Но в реальности взаимодействие внешнего и внутреннего источников существует, и оно формирует "столб" аномального понижения электропроводности пород над УВЗ. При этом следует учитывать, что изменение физических свойств пород происходит за счет преимущественно вертикальной миграции УВ. Она сопровождается формированием зон минеральных новообразований: сульфидной минерализации, карбонатизации и др., что приводит к изменению таких физических свойств пород, как электропроводность, магнитная проницаемость, а также к смещению окислительно-восстановительной обстановки в сторону восстановительной щелочного характера [13].

Методы основаны на пассивной регистрации электрической и магнитной составляющих поля в диапазоне частот 0,002–500 Гц. По результатам измерений определяется удельное электрическое сопротивление участков разреза. Выделение УВЗ производится по характерным для нее удельным сопротивлениям.

### Радиоволновые методы

**Метод Рэдойл** используется для прямых поисков и разведки УВЗ и основан на регистрации границ залежи по аномалиям кривых электрической напряженности поля поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ) на фиксированной частоте узкого частотного диапазона 1,5–2 МГц. Излом кривой напряженности поля объясняется дифракцией радиоволны на контакте нефть-вода. Как показывают данные полевых исследований [14], методом удалось выделить несколько десятков месторождений нефти, находящихся на глубинах свыше 1,5 км. Однако, с точки зрения классической электродинамики в реальных породах технически сложно обеспечить глубинность распространения и регистрацию отклика радиоволны используемого диапазона частот свыше 100 м.

Помимо отсутствия теоретического обоснования метода и технических недостатков, связанных с необходимостью контроля мощности излучения стационарного передатчика, чувствительности и усиления приемника. Метод обладает низкой точностью при классификации аномалий по породам.

В **методе Слетерли** производится оценка модуля и фазовой компоненты коэффициента отражения ЭМВ от исследуемой среды на частотах 1,5–1,7 МГц. Результаты измерений, проведенных по методу, показывают, что максимум значения модуля коэффициента отражения наблюдается над УВЗ, проявление которого не связано с водо-нефтяным контактом, а зависит от мощности залежи. Фазовые измерения показывают, что приращение фаз между прямой и отраженной волнами постепенно возрастает от края к центру залежи и достигает 20–30° [14].

Главная трудность метода состоит в точном измерении фазы коэффициента отражения. Теоретическое обоснование метода отсутствует.

**Метод радиокмпарирования и пеленгации** (радиокип) основан на изучении полей удаленных радиостанций [15]. Для реализации его используется портативная приемная аппаратура. Измерения проводят в дальней зоне излучения на частотах 8–25 кГц, где на фоне первичного поля облегчается выделение аномалий.

Методом изучают как магнитное, так и электрическое поле. По аномалиям магнитного поля осуществляют, главным образом, поиск локальных проводящих объектов, электрического

поля, ведут картирование горных пород с разным удельным сопротивлением и поиск высокоомных включений. По отношению горизонтальных составляющих электрического и магнитного полей определяют эффективное удельное сопротивление пород.

Сверхдлинноволновый (СДВ) вариант метода является более глубинным, чем длинноволновый (ДВ), поскольку с понижением частоты увеличивается глубина проникновения электромагнитного поля в землю, поэтому его используют для геологоструктурного картирования рудных полей и месторождений, а также для поисков контрастных по электропроводности полезных ископаемых.

Основные недостатки метода связаны с малой глубиной исследований в районах с низкоомным разрезом, существованием неблагоприятных пеленгов радиостанций для возбуждения электропроводных объектов, возникновением аномалий, обусловленных локальными формами рельефа и искусственными проводниками (линиями электропередач и проводной связи, трубопроводами и т.д.), существенным влиянием разрядов атмосферного электричества, наличием вариаций поля во времени, связанным с непостоянством отражательной способности ионосферы.

Метод реализуется следующим образом. В начале полевых исследований проводят выбор частоты, определяемый стабильностью работы радиостанции, достаточно высокой по отношению к помехам напряженностью поля, благоприятным пеленгом, который не должен превышать с их простиранием угол, больший  $70^\circ$ . В методе радиокип используют поля радиостанций мощностью десятки и сотни киловатт. Для измерений аномалий магнитного поля используются магнитные антенны, окруженные электростатическим экраном, а электрического поля — заземляемые на концах или изолированные от среды открытые линии или электрические антенны типа диполь.

Метод применяется при исследованиях на поверхности Земли, при аэросъемках, а также при изучении скважин и горных выработок.

Со второй половины семидесятых годов XX века в наземном варианте применяется в разведке на нефтегазовые месторождения и скопления на территории Республики Беларусь [16], а с 1995 года в аэроварианте для картирования в Российской Федерации [17].

Для борьбы с временными вариациями используется метод сравнения данных двух или более измерительных приемников [18]. При этом отсутствие излучения удаленной радиостанции строго фиксируется путем синхронного измерения поля на базовом стационарном пункте приема.

**Метод радиоволнового просвечивания (РП)** [19] основан на изучении поглощения электромагнитных волн различных частот в толщах пород, расположенных между горными выработками или буровыми скважинами. При увеличении электропроводности и диэлектрической проницаемости горных пород сильнее проявляется поглощение электромагнитной энергии. Для реализации метода радиопередатчик помещают в скважине, а в другой параллельной ей скважине осуществляют прием излученных волн, регистрируя их интенсивность, которая зависит от расстояния между передатчиком и приемником. Перемещая приемник по скважине, можно выделить места повышенной и пониженной интенсивности приема в зависимости от свойств среды конкретного уровня разреза.

РП применяется на разных стадиях геологоразведочных работ в одном из вариантов — изучение в пространстве между двумя профилями (подземными или между подземным и на поверхности Земли) и наблюдение вдоль прямолинейного профиля.

**Метод радиопрофилирования (РВП)** [19] предназначен для исследования пространства вокруг скважин, заключающийся в том, что передатчик и приемник перемещаются по вертикали одновременно при неизменном расстоянии между ними. Наблюдения при этом проводятся перед объектом исследования. Аномальный эффект создается отраженной волной.

Преимуществами РВП являются снижение влияния искусственных проводников, поскольку приемная антенна ориентируется перпендикулярно таким проводникам, снижение мощности первичного поля за счет применения направленных антенн.

## Методы, основанные на представлении УВЗ в виде анизотропного образования

Метод альтернативных частот [20] основан на результатах исследований частотной зависимости контраста поверхностного импеданса сред с различными электродинамическими параметрами [21]. В диапазоне частот 1–2 МГц реальная составляющая поверхностного импеданса среды над залежью УВ преобладает над мнимой, что соответствует его фазовой компоненте  $\varphi_Z < 45^\circ$ . В области частот 10–100 МГц анизотропная поверхность имеет индуктивный характер, так как фаза поверхностного импеданса  $\varphi_Z > 45^\circ$ . Напряженность  $E_1$  поля ПЭВ, определенная на фиксированной частоте  $f_1$  из поддиапазона 1–2 МГц, на границе "вмещающие породы–УВЗ" резко уменьшится. Аномальный скачок напряженности при этом эквивалентен изменению поля ПЭВ на границе типа "море–суша" (рис. 1,а). Использование альтернативной фиксированной частоты  $f_2$  из поддиапазона 10–100 МГц позволяет зарегистрировать на границе контура УВЗ противоположную по отношению к первой аномалию напряженности электрического поля  $E_2$  поверхностной волны. Изменение напряженности поля на альтернативной частоте эквивалентно изменению поля ПЭВ на границе типа "суша–море" (рис. 1,б). Таким образом, аномалии поля ПЭВ на границе контура УВЗ для двух частот  $f_1$  и  $f_2$  оказываются противоположными. Определяя отношение напряженностей поля двух частот

$$g_k = \frac{E_2}{E_1} = G(x), \quad (2)$$

зарегистрированных в  $k$ -й точке исследуемого профиля, получим скачок отношения напряженностей на границе контура УВЗ, в несколько раз превышающий аномалию напряженности электрического поля на частоте  $f_1$  (рис. 1,в).

Вне контура залежи, также, как и над ней, отношение напряженностей остается неизменным и принимает значения  $g_в$  и  $g_н$ , соответственно. Скачок отношения  $\Delta g = g_в - g_н$  в точке  $x$  указывает на изменение свойств подстилающей среды.

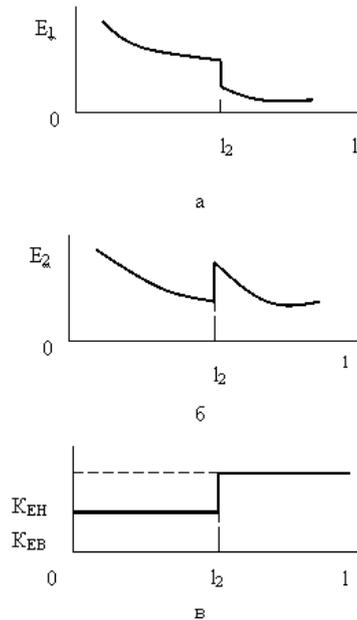


Рис. 1. Поле ПЭВ на частотах  $f_1$  (а) и  $f_2$  (б) и отношение амплитуд поля на альтернативных частотах

Радиосистема, реализующая способ, строится по двухканальной схеме на основе разнесения по частоте и вычисления отношения напряженности поля каналов. При одновременной работе двух передатчиков в результате пространственной суперпозиции полей могут возникать искажения составляющих поля. Для исключения этого на практике можно использовать слож-

ный двухчастотный сигнал, разнесенный по времени. Однако данный вариант реализации способа потребует дополнительной схемы синхронизации на приемном конце радиоканала.

В методе **равноудаленных приемников** [22] осуществляется сравнение напряженностей ЭМВ, измеренных на одинаковых расстояниях от передатчика. Передатчик устанавливают в фиксированной точке профиля и проводят измерения напряженности поля в равноудаленных точках  $x_{npk}$  и  $x_{обрk} - E_{np}$  и  $E_{обр}$ . По полученным данным определяется коэффициент отношения

$$W_k = \frac{E_{np}(x_{npk})}{E_{обр}(x_{обрk})} \quad (3)$$

и для серии точек исследуемого профиля строится диаграмма  $W_k = f(x)$ . Границу залежи определяют по скачку  $W_k$ .

Для реализации способа применяются два идентичных приемных устройства, позволяющих осуществить точное измерение значений напряженности электрического поля в равноудаленных точках выбранной трассы относительно опорной точки, соответствующей положению стационарного источника излучения. При этом исключается необходимость в создании опорного канала или специальных измерений на участке с известными параметрами вмещающих пород.

Вместе с тем метод требует большого времени для аттестации исследуемого участка при использовании одного приемника. Реализация способа с применением двух приемников требует создания дополнительного канала синхронизации. Поэтому метод может быть использован преимущественно на стадии уточнения границ залежи.

**Метод трансформации диаграммы направленности антенны** [23] основан на представлении УВЗ в виде анизотропного образования плазмopodobного типа, которое оказывает влияние на характеристики направленности антенных излучателей, проявляющихся в расширении диаграммы направленности (ДН) по уровню половинной мощности за счет изменения проводимости плазмopodobной среды в частотном диапазоне.

Метод заключается в измерении смещения максимума и/или минимума ДН, ее расширении или сжатии по уровню половинной мощности.

По нормированным ДН антенн (рис. 2,а) оцениваются  $\Theta_{max}, \Theta_{min}$  — угловые отклонения максимума и минимума ДН от направления Север (N) — Юг (S);  $F_1(\Theta_{max}), F_1(\Theta_{min})$  и  $F_2(\Theta_{max}), F_2(\Theta_{min})$  — максимумы и минимумы ДН, причем  $F_2(\Theta_{max}) = F_1(\Theta_{max} + 180^\circ)$ . При известных величинах данных параметров вне и над УВЗ оценка искажений производится по выражениям:

$$\begin{aligned} \Delta\Theta_{max1,2} &= \Theta_{max1,2}^B - \Theta_{max1,2}^H, \\ \Delta\Theta_{min1,2} &= \Theta_{min1,2}^B - \Theta_{min1,2}^H, \\ \Delta F_{min1,2} &= F_{min1,2}^B - F_{min1,2}^H, \end{aligned} \quad (4)$$

надстрочные индексы "в" и "н" соответствуют измерениям вне и над УВЗ.

На рис. 2,б для примера приведены ДН электрического диполя, измеренных на частоте 15,1 кГц. Над контуром залежи происходит смещение максимума и минимума ДН антенны на  $10^\circ$ . Помимо угловых изменений происходит расширение ДН на уровне минимальных амплитуд  $\Delta F_{min1} = \Delta F_{min2} = 0,7$ . Аналогичные угловые смещения имеют ДН, полученные на частоте 17,8 и 18,6 кГц.

На высоких частотах метод предполагает использование направленных антенных излучателей и требует их широкого пространственного разнеса для обеспечения плоского фронта ЭМВ на апертуре приемной антенны.

Суть **метода комбинационной частоты** [24] заключается в регистрации естественного излучения УВЗ, представленного в виде гармонического колебания, взаимодействующего с по-

лем поверхностной ЭМВ. Измерения естественного излучения производится на комбинационной частоте  $F = f_1 \pm f_{1omp}$ , где  $f_1$  — частота зондирующего и  $f_{1omp}$  — частота отраженного сигналов.

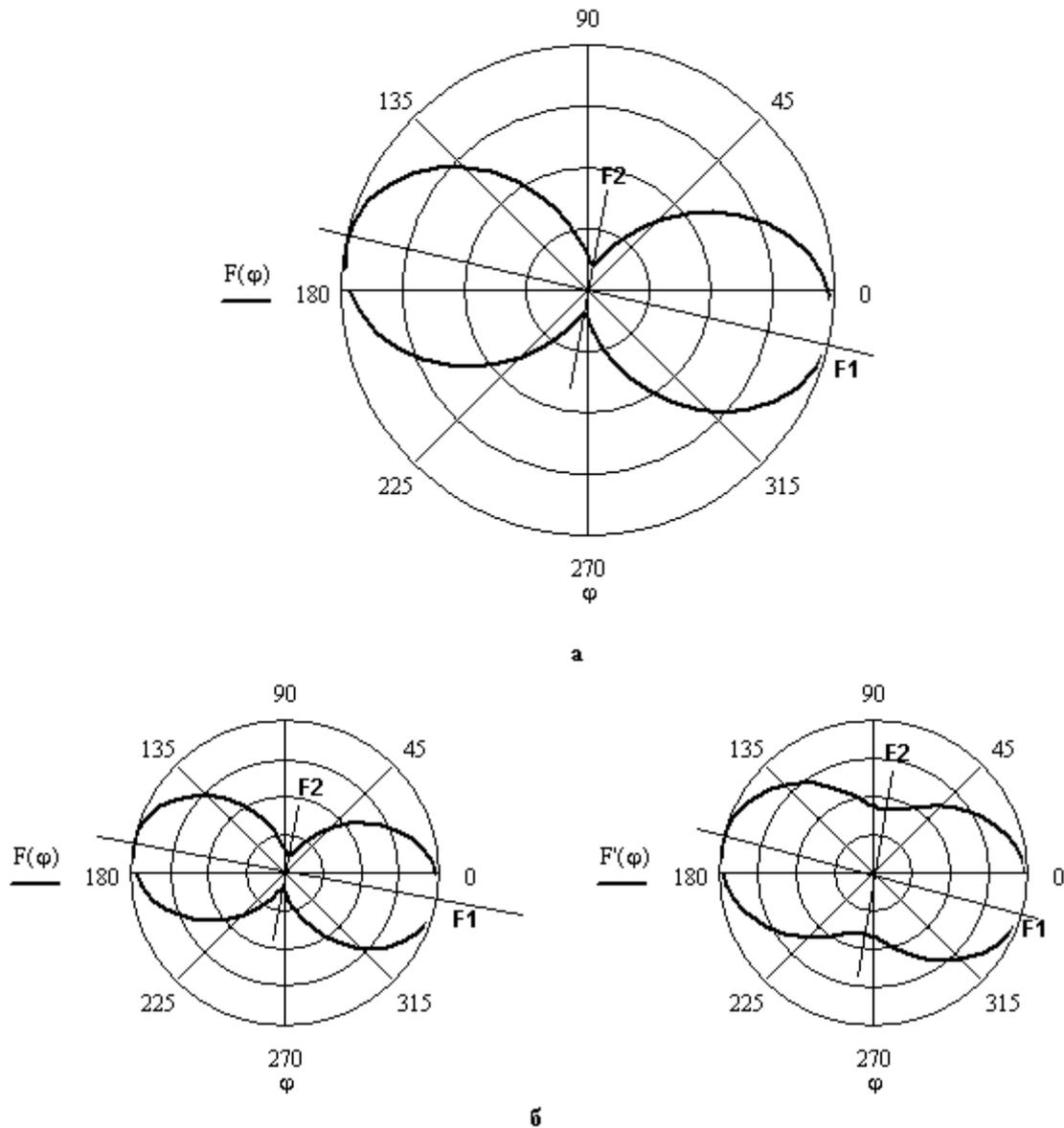


Рис. 2. Трансформированная ДН антенны (а), ДН электрического диполя, измеренных на частоте 15,1 кГц (б)

Устройство, реализующее метод, строилось по схеме, приведенной на рис. 3,а. Генератор 3 вырабатывает сигнал, соответствующий 8-й гармонике резонансного взаимодействия, обеспечивающего наиболее точное выделение естественного излучения. Часть ЭМВ с частотой  $f_1$  используется в качестве опорной и подается на смеситель 5 через направленный ответвитель 4. Сигнал, излученный антенной 1, отражаясь от поверхности 7, поступает на антенну 2. Смешивание отраженного и опорного сигналов производится на смесителе 5, с выхода которого сигнал с частотой  $F$  поступает на приемник б.

Аттестация методом проводится по зависимости отношения  $V = \frac{A}{E}$  от расстояния вдоль профиля, где  $A$  — регистрируемая величина напряженности,  $E$  — амплитуда собственного излучения вмещающих пород (рис. 3,б).

**Метод с использованием источника подсвета** основан на регистрации аномального поведения поля ПЭВ с использованием либо естественного или искусственного акустического источника, либо специального передатчика подсвета, работающего на фиксированной частоте.

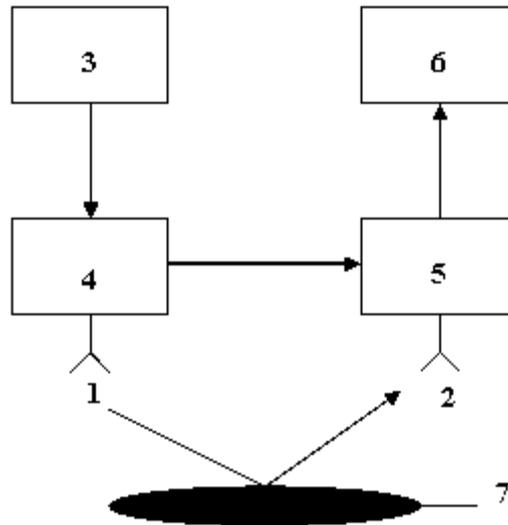


Рис. 3. Структурная схема устройства, реализующего метод комбинационной частоты

Апробация метода с использованием акустического сигнала, проведенная на действующем месторождении УВ, показала возможность регистрации искажений амплитуды поверхностной ЭМВ над анизотропным включением, к которому приурочена залежь, при смещении источника акустического возмущения [25].

При использовании передатчика подсвета методика регистрации границ УВЗ заключается в определении отклонений измеряемой амплитуды напряженности поля ПЭВ при сохранении пространственного разнеса измерительного приемника и передатчика подсвета.

Недостатками метода является необходимость поддержания фиксированного расстояния между приемником и передатчиком подсвета, трудности реализации метода в сложных геологических условиях.

Метод сравнения входных импедансов антенн с ортогональными поляризациями [26] является модернизацией метода РВП. Элементарный электрический вибратор располагается на высоте  $h_a$  над поверхностью однородной среды, свойства которой описываются комплексной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_r$  на частоте  $f_0$ , имеет фиксированные величины входных сопротивлений при вертикальной и горизонтальной ориентациях:

$$\begin{aligned} Z_A(\varepsilon_r, h_a, f_0) &= \text{const}, \\ Z_a(\varepsilon_r, h_a, f_0) &= \text{const}. \end{aligned} \quad (5)$$

Коэффициент отношения входных импедансов

$$\delta_u = \frac{Z_g}{Z_c}, \quad (6)$$

который имеет постоянную величину для заданных значений  $h_a, \varepsilon_r, f_0$ , т.е.

$$\delta_u = \phi(\varepsilon_r, h_a, f_0), \quad (7)$$

и характеризует степень отличия входных сопротивлений антенн с ортогональными поляризациями.

Изменение контраста поляризационных искажений над УВЗ (величина коэффициента отношения импедансов антенн)  $\delta_a$  будет иметь отличие от  $\delta_u$ , зарегистрированного вне УВЗ, т.е.

$$\delta_u \neq \delta_a \quad \text{при } h_a = \text{const}.$$

Радиотехническая система, реализующая метод, строится по двухканальной схеме. Каналы имеют разнос по поляризации ЭМВ и работают на фиксированной частоте.

### Метод измерения отношения коэффициента отражения

Результаты теоретического исследования характеристик зондирующего сигнала в СВЧ диапазоне свидетельствуют о существовании контрастов коэффициентов отражения и кроссполяризации между средой над УВЗ и подстилающей поверхностью (ПП) при нормальном и квазискользящем распространении радиоволн. Наличие контраста отражательных характеристик

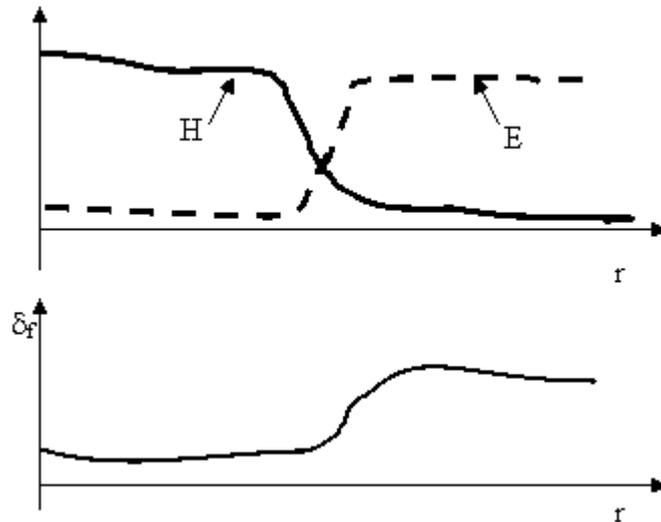


Рис. 4 Изменение коэффициентов отражения в двух плоскостях поляризации (а) и их отношение на двух частотах (б) вдоль профиля

ЭМВ позволяет идентифицировать УВЗ по отличию коэффициентов отражения как по частоте, так и по поляризации. Для оценки контраста используются отношения, определяемые как

$$\delta_f = \frac{\Gamma_E}{\Gamma_H},$$

$$\delta_f = \frac{\Gamma_{f_1}}{\Gamma_{f_2}},$$
(8)

где  $\Gamma_E$ ,  $\Gamma_H$  — коэффициенты отражения в  $E$ - и  $H$ -плоскостях поляризации;  $\Gamma_{f_1}$ ,  $\Gamma_{f_2}$  — коэффициенты отражения на двух частотах при нормальном и скользящем распространении радиоволн.

Исследования на реально действующем месторождении нефти позволили зарегистрировать инверсию коэффициентов отражения волноводного излучателя (рис. 4,а), измеренных в двух плоскостях поляризации ("эффект ножниц"), а также приращение отношения коэффициентов излучателей на двух частотах СВЧ- и КВЧ-диапазонов, разнящихся в 3,5 раза (рис. 4,б).

Метод реализуется по двухканальной схеме, имеющей разнос по поляризации (рис. 5,а) или частоте (рис. 5,б).

Метод, основанный на сравнении характеристик антенных излучателей, имеющих противоположное направление вращения вектора поляризации [27], основан на применении антенных датчиков круговой левой и правой поляризации и последующей оценке входных сопротивлений и/или коэффициента эллиптичности. Практическая реализация метода в СВЧ диапазоне

позволяет существенно снизить массу и габариты радиосистемы, но требует дискретизации исследуемой трассы для привязки к результатам геофизических исследований.

Способ может быть реализован в нескольких вариантах. Наиболее простым подходом при этом является система (рис. 5,а), содержащая генератор 3, делитель 4, измерители входных импедансов 5,6 двух одинаковых каналов, имеющих одинаковые антенные датчики с противоположным направлением вращения круговой поляризации 1, 2 (левой и правой). При нормальном излучении, датчики согласуются с исследуемой средой и калибруются. Регистрация границ УВЗ производится по отношению входных импедансов датчиков (схема сравнения 7).

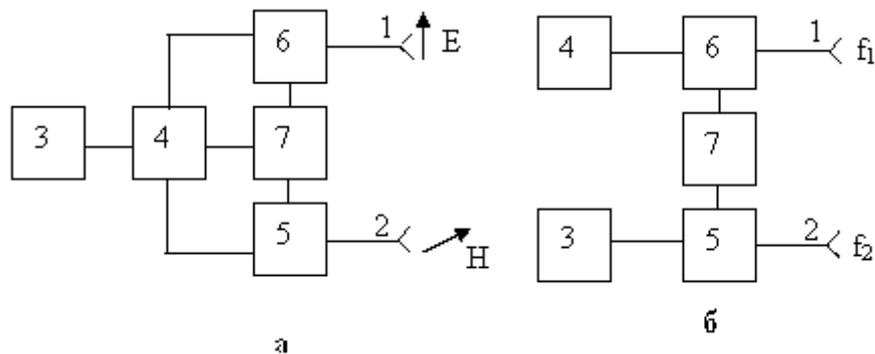


Рис. 5 Двухканальные схемы реализации метода по поляризации (а) и частоте (б): 1 — антенна  $E$ -поляризации; 2 — антенна  $H$ -поляризации; 3 — генератор частоты  $f_1$ ; 4 — делитель; 5, 6 — измеритель сопротивления; 7 — схема отношения; 8 — антенна частоты  $f_2$   $E$ -поляризации; 9 — генератор частоты  $f_2$

**Методы с использованием сложных волн.** Исследование взаимодействия сложной ЭМВ с анизотропной средой над УВЗ позволяет оптимизировать параметры электродинамических сигналов для поиска и выделения границ залежей УВ. Анализ воздействия на среду с анизотропными свойствами двухчастотной ЭМВ с различным соотношением амплитуд и частот [28] показал возможность искусственного изменения резонансов взаимодействия преимущественно за счет разности частот, участвующих в формировании сложного сигнала, с предпочтительным использованием маломощного высокочастотного и мощного низкочастотного источников.

Теоретический анализ дисперсии тензора диэлектрической проницаемости для случая АМ-сигнала показал, что изменение модулирующей частоты и коэффициента амплитудной модуляции ведет к изменению электродинамических свойств среды над УВЗ [29]. При этом амплитудная модуляция колебания может привести лишь к искажению фазовой компоненты отраженного от поверхности сигнала на двух (нескольких) частотах, выбираемых по частотной зависимости комбинационного элемента, однозначно описывающего свойства среды над УВЗ. Радиосистема строится по многоканальной схеме с разносом по частоте и производит оценку отличия фаз отраженных колебаний.

Применение частотно-модулированных сигналов с тональной модуляцией связано с выбором индекса угловой модуляции. Исследования свидетельствуют о жесткой связи электродинамических параметров анизотропной среды и девиации частоты [30].

### Заключение

Проведенный обзор электродинамических методов, применяемых в современной электроразведке УВЗ, свидетельствует о возрастающих требованиях к точности измерений, определяемых аппаратурной реализацией методов. Оптимизация электродинамических сигналов для устройств и систем в этой связи проводится на основе анализа спектрального состава колебаний по сложным алгоритмам с использованием моделей, учитывающих специфические свойства исследуемых сред.

В последнее десятилетие сделан акцент на моделирование процесса взаимодействия ЭМВ с залежами нефти и газа, в котором доминирующим является резонансный эффект.

Применение колебаний сложной формы при использовании многорезонансной модели взаимодействия ЭМВ и среды над УВЗ позволяет проводить не только поиск границ залежей, но и осуществить качественную оценку электродинамических параметров сред, что может быть использовано для экологического мониторинга Земли.

## ELECTRODINAMIC METHODS OF SURVEYS FOR HYDROCARBON DEPOSITS

D.V. GOLOLOBOV, P.M. KATLEROV

### Abstract

Offered the review of modern geoelectrical surveys with the purpose to find and delineate oil (hydrocarbons) deposits. Showed tendencies of the development of these methods and hardware solutions to their achievement.

### Литература

1. Электроразведка. Справочник геофизика /Под ред. В.К. Хмелевского и В.М. Бондаренко. М.: Недра, 1989. Т.2. С.50-121.
2. Москвичев В.Н. Исследование взаимодействия ЭМВ с углеводородной залежью// Радиотехника и электроника. Мн.:Высш. шк., 1989. Вып. 18. С. 91-96
3. Геник И.В. К расчету отраженных высокочастотных электромагнитных сигналов от горизонтальнослоистой земли //Геол. и полезн. ископаемые зап. Урала: Матер. регион. конф. Пермь, 1997. С.181-182.
4. De Lima Olinar A.L., Arom ja Fabio F.S. By groundpenetrating radar ana spectral induced polarization //SEG IDENVER-96: Tokio, 1996. С. 231.
5. Озерков Э.А., Живодров В.А., Лепешкин В.П., и др. Новая технология компьютерной обработки материалов ЗСБ для прямого прогноза залежей нефти и газа (РЭМИС) // Тез. докладов науч.-практ. семинар. Саратов, 1999. С. 41-43.
6. Korephanov V, Dudkin F. Magnetotelluric sounding at sea bottom-methodology and instrumntnation // EAGE 6 Conf/ and techn. Exhip. Helsinki. 1999. С.143.
7. Hordt A., Vozoff K. Analysis of time-lapse TEM data for nuclearground gas storage monitoring //EAGE Goth. Conf. and Tech. Exhib. Leipzig, Germany, 8-12 June 1998. PP. 10-16
8. Пат. 2134893 Россия. Способ электроразведки при поисках нефтегазовых месторождений./ В.П.Лепешкин, Б.А.Шабанов, В.А. Михайлов, В.А.Живодров, Э.Л. Озерков. Заявка 18.2.98; опубл. 20.8.99. Бюл.№23.
9. Бубнов В.М. Результаты электроразведочных работ ЗСБ на Юктакойской площади //Отчет Надежинской электроразведочной партии №79190-91. Тюмень, 1992
10. Кузнецов О.Л., Арутюнов С.Л., Востров Н.Н., Дворников В.В. Российская инфразвуковая технология АНЧАР: уникальная практика разведки и освоения нефтяных и газовых ресурсов // Международная геофизическая конференция. М., 2000. Секция 2. С.193.
11. Frasher A. Self-potential anomalies as possible indicators in search for oil and gas reservoirs //57th EAGE Conf. and Tech. Exib., 1995. Vol 1. P.8
12. Рикитаки Т. Электромагнетизм и внутреннее строение Земли. Л.: Недра, 1968.
13. Бабкин Ю.А. Электрохимические процессы в земной коре на примере залежи нефти и газа //Литасфера. Мн.: ИГН НАНБ, 1998. №9. С.121-124
14. Фролов А.Д., Озеров В.Д. Поиски нефтегазовых месторождений радиоволновыми методами// Региональная, разведческая и промысловая геофизика. М.: ВИЭМС, 1969. № 19. 32 с.
15. Гордеев С.Г., Седельников Э.С., Тархов А.Г. Электроразведка методом радиокип. М.: Недра, 1981. С.132

16. Стадник Ю.Н., Довгаль Г.Н., Гололобов Д.В. Радиоволновая геофизика в Беларуси //Літасфера. Мн.: ИГН НАНБ, 1998. №9. С. 113-120
17. Барышников И.А., Татарский А.Ю. Многопараметровая аэроаэрозондировка методом СДВР при аэрогеофизических исследованиях на нефтяных объектах Татарии //Тез. Докл. Междунар. геофиз. конф.СПб., 1996. –С. 39–40.
18. А.с. 1233076 СССР. Способ геоэлектроразведки и устройство для его осуществления // Ю.В.Несынов, В.А. Попов. Заявл. 30.01.84, опубл. 23.05.86. Бюл. №19
19. Тархов А.Г. Поиск и разведка полезных ископаемых и геологическое картирование радиоволновым методом (радиокип). М.: ВИЭМС, 1965. С. 21-35.
20. А.с. 1639281 СССР. Способ геоэлектроразведки углеводородных залежей / В.Н. Москвичев, Ю.Н. Стадник, Д.В. Гололобов. Заявл. 18.05.89.
21. Гололобов Д.В., Москвичев В.Н. Использование поляризационных свойств зондирующего сигнала при диагностике плазмоподобных сред //Радиотехника и электроника. Мн.: Высш. Школа, 1994. Вып.22. С.66-74.
22. Пат. №5556 РБ. Способ геоэлектроразведки /Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич, Ю.Н. Стадник. Заяв.07.08.2000, опубл. 05.06.2003.
23. Пат. №3426 РБ. Способ геоэлектроразведки углеводородных залежей /Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич. №970349; заявл. 18.05.89
24. Гололобов Д.В., Москвичев В.Н., Турук Г.П., Янушкевич В.Ф. Электродинамические параметры подводных источников в поле поверхностной электромагнитной волны //Тез. Докл. 35-й Всероссийской НТК. Владивосток, 1992. Т.1, ч.1. С.59-62.
25. А. с. 1816126 СССР. Способ геоэлектроразведки / Д.В. Гололобов, В.Н. Москвичев. Заявл. 15.12.90
26. Заявка №92010085 РФ. Способ геоэлектроразведки УВЗ / Д.В. Гололобов, В.Н. Москвичев, С.П. Грицай. Заявл. 07.12.92. Опубл. 27.02.95
27. Гололобов Д.В., Янушкевич В.Ф. Радиотехнические системы поиска и идентификации углеводородных залежей в режиме двухчастотного взаимодействия /Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук, 2002. №1. С. 49-54.
28. Гололобов Д.В., Янушкевич В.Ф. Поверхностный импеданс анизотропной среды при двухчастотном взаимодействии ЭМВ /Изв. Белорус. инж. акад. Мн., 2001. №11(1). С. 101-104.
29. Гололобов Д.В., Янушкевич В.Ф. Взаимодействие АМ-сигнала с углеводородной залежью// Тез. докл. НТК "Современные проблемы радиотехники, электроники и связи", посвященной 100-летию радио. БГУИР. Минск, 1995. С. 6-7.
30. Гололобов Д.В., Цивис Н.В., Янушкевич В.Ф., Калинин С.В., Ходыко Д.Л. Взаимодействие ЧМ-сигнала с анизотропной средой //Тез. докл. Междунар. НТК Новополюцк, 2002. С.263-266.