

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ МЕТОДОВ ПРИ ПОИСКАХ ЗАЛЕЖЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

Проанализирован опыт применения различных методов электроразведки для поисков залежей нефти и газа как в западных странах, так и на территории стран бывшего СССР. Этот анализ охватывает временн $\square$ й интервал от начала 50-х годов прошлого века до настоящего времени. На основании этого анализа сформулирован круг задач, которые может успешно решать электроразведка при поисках залежей нефти и газа. Решение ряда из перечисленных задач иллюстрируется конкретными примерами из разных регионов мира. На основании анализа сегодняшнего состояния аппаратурной базы, а также программного обеспечения для обработки и интерпретации делается вывод, что на сегодняшний день, при наличии 5-го поколения многофункциональной аппаратуры, метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ) становится ведущим при нефтегазопоисковых работах благодаря достигнутой точности получения функций отклика среды, мобильности, производительности, относительно низкой себестоимости, экологической чистоты, возможности проводить работы в любое время года, в самых разных климатических условиях. Обсуждается целесообразность комплексирования МТЗ с модификациями метода ВП, а в случае очень высокого уровня промышленных помех – с методами ЧЭЗ или ЗС.

Author has analyzed the experience of using different kinds of electroprospecting methods for oil and gas exploration as in west countries so on the territory of former USSR. The analysis takes wide time interval: from 1950s until now days. The list of tasks, which can be successfully solved by electroprospecting methods, had been formulated on the base of this analysis. Some examples of successful electroprospecting application in different parts of the globe for oil and gas prospecting are shown in the paper. Fifth generation of multifunctional electroprospecting as well as new software make method MT the number one electroprospecting method for hydrocarbon explorations. Now the advantages of MT are good data accuracy of the data, mobility, high productivity, relatively low cost, environmental cleanliness, possibility to provide field survey during all year seasons in very different climate conditions. Necessity to integrate MT with different modification of IP methods is discussed also. In the case of very high level of industrial electromagnetic noise it is also recommended to integrate MT with FDEM or LowTEM.

*Введение.* Электроразведка является инструментом, с помощью которого можно успешно решать целый круг задач, связанных с поисками залежей углеводородов. Данный метод существенно дополняет сейсморазведку, а в ряде случаев позволяет решить задачи, которые сейсморазведкой решаются неоднозначно или их решение обходится слишком дорого, либо сейсморазведка не может выполнить работы в определенном районе из-за экологических, геологических, климатических и прочих условий. Кроме того, при несомненных больших успехах развития сейсморазведки в по-

следние несколько десятилетий она не в состоянии 100-процентно гарантировать наличие углеводородов в предполагаемой ловушке. Поэтому затраты на дополнительную информацию, которую могут дать другие геофизические методы, в первую очередь электроразведка, которая стоит 10-20 % от стоимости сейсморазведочных работ и может существенно уменьшить степень риска бурения, являются вполне резонными затратами для нефтяных компаний. В настоящее время электромагнитные (ЭМ) методы вошли в практику морских поисков углеводородов и постепенно возвращаются на сушу.

Кроме того, предварительное проведение электроразведочных работ может помочь выбрать наиболее благоприятные участки для постановки сейсморазведочных работ в пределах лицензионной площади.

На стадии региональных работ магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) решает задачи картирования осадочных бассейнов, древних рифтов, заполненных осадочными отложениями, выделения глубинных разломов, горстовых структур фундамента, крупных антиклинальных поднятий, а также зон улучшенных коллекторских свойств продуктивных пластов. На стадии поисковых работ электроразведка МТЗ, CSAMT, частотным электромагнитным зондированием (ЧЭЗ), зондированием становлением поля (ЗС) позволяет оценить структурную обстановку, картировать палеодолины, рифовые структуры, выявить специфические аномалии удельного сопротивления, анизотропии удельного сопротивления, связанные с эпигенетическими изменениями пород над залежью углеводородов. Детальные работы, шаг которых по профилям составляет 40-100 м и в которых часто участвует также метод вызванной поляризации (ВП), позволяют установить блоковую структуру залежи и продуктивные блоки, зоны доломитизации и т.п., в том числе картирование поверхностных неоднородностей (например, вечная мерзлота) для введения статических поправок в сейсморазведку. Пятое поколение многофункциональной ЭМ-аппаратуры не только позволило существенно повысить точность и производительность работ, снизить их себестоимость, но и несколько изменило удельное соотношение применяемых ЭМ-методов в сторону мобильных, использующих естественное ЭМ-поле Земли (МТЗ и его модификации).

На территории бывшего Советского Союза электроразведка довольно интенсивно применялась для поисков залежей нефти и газа начиная с 50-х годов прошлого века. За несколько десятков лет геофизики стран, образовавшихся на постсоветском пространстве, накопили значительный опыт применения различных модификаций электроразведки для этой цели. Долгие годы од-

ной из основных проблем здесь было отсутствие мобильной высокопроизводительной и высокоточной многофункциональной аппаратуры. Наличие такой аппаратуры позволяет с успехом использовать накопленный опыт. Это наглядно показали работы, проведенные в западном Узбекистане зимой 2001-2002 годов, а также те работы, которые ведут различные российские организации с помощью современной аппаратуры.

На Западе электроразведка начала принимать существенное участие в нефтепоисковых работах начиная с топливного кризиса 1973 г. Основными методами являлись МТЗ, CSAMT и ВП. Были попытки использовать технологии, рассчитанные на регистрацию отражений электромагнитного поля от высокоомной залежи, однако широкого распространения они не получили. Высокая стоимость полевых работ традиционными методами (особенно первым методом МТЗ) и проблемы с двух- и трехмерной интерпретацией, с учетом влияния поверхностных неоднородностей при интерпретации, редкий шаг наблюдений, не позволяющий детально описать искомый объект, привели к сокращению объемов ЭМ-работ в 90-е годы. Появление в конце 1990-х годов нового поколения аппаратуры, современного интерпретационного программного обеспечения, успехи вычислительной техники в корне меняют ситуацию на рынке геофизических работ.

*Физические предпосылки применения электроразведки.* Физической предпосылкой является разница в удельном электрическом сопротивлении пород разной литологии. Благодаря этому различные стратиграфические осадочные комплексы отличаются по удельному электрическому сопротивлению, что создает благоприятные предпосылки для их картирования электроразведочными методами. Другой предпосылкой является различие стратиграфических комплексов не только по абсолютной величине модуля кажущегося сопротивления, но и по анизотропии. Как правило, под этим термином понимается отношение вертикального сопротивления к среднему горизонтальному сопротивлению, что легко рассчитывается по каротажным данным и может быть вос-

произведено в полевом эксперименте, например, в методе ЧЭЗ при измерении параллельной электрическому питающему диполю горизонтальной электрической компоненты ЭМ- поля и вертикальной магнитной компоненты этого же поля.

Применение тензорных технологий электроразведки, таких, как МТЗ и CSAMT, позволило установить наличие горизонтальной анизотропии, различной для разновозрастных осадочных комплексов, что связано с различной геологической историей их формирования, разнонаправленной трещиноватостью, пористостью, проницаемостью и т.п. Эти факторы также могут быть использованы для локализации перспективных площадей. Наконец, как бы ни была хороша покрышка, залежь углеводородов течет, т.е. поток углеводородов и углекислого газа устремляется вверх, и в течение длительного геологического времени над залежью образуется шапка эпигенетически измененных пород. При этом преобладают процессы кальцитизации (уменьшаются пористость и проницаемость карбонатных пород) и пириитизации (уменьшается удельное сопротивление и существенно увеличивается вызванная поляризация пород) в терригенных отложениях. В итоге над залежью углеводородов наблюдается суммарный эффект: аномалия повышенного сопротивления и аномалия вызванной поляризации характерной формы. Эпигенетические изменения пород над залежью происходят в связи с постепенным просачиванием через покрышку летучих газов. Наибольшие изменения претерпевают породы в интервале 600-900 м над залежью, хотя в зависимости от конкретной геологической обстановки эти параметры могут сильно варьировать.

Еще одно очень важное электрическое свойство пород – вызванная поляризация, заключается в способности пород поляризоваться под действием протекающего тока и затем в течение какого-то времени хранить электрический потенциал, который затухает со временем. Значения скорости затухания, как и наведенного потенциала, являются свойствами определенных типов пород или объясняются присутствием известных ми-

нералов. Практически над каждым месторождением наблюдаются аномалии вызванной поляризации, причем зачастую они имеют вполне определенную форму, получившую название «сомбреро».

Над многими залежами углеводородов наблюдаются аномалии естественного потенциала, характеризующего собственный электрический потенциал горных пород, возникающий под действием различных процессов. Эта особенность также может быть использована как поисковый признак.

Наконец, сама залежь представляет собой очень высокоомный пласт, зачастую подпираемый низкоомными породами, поры которых заполнены соленой водой. Этот пласт или комбинация пластов в благоприятных условиях могут быть зафиксированы при наземных или подводных электроразведочных работах в виде высокоомной аномалии или комбинированной аномалии: высокоомной, окруженной низкоомными значениями.

*Перечень основных задач, решаемых электроразведкой.* Обилие электрических параметров, которые могут изменяться при наличии залежей углеводородов, позволяет сформулировать целый круг задач, которые могут быть успешно решены наземной электроразведкой:

- 1) быстрая рекогносировка и картирование с целью изучения строения осадочных бассейнов и выявления районов, наиболее благоприятных для поисков залежей углеводородов;
- 2) поиски и изучение палеорифтов;
- 3) выделение крупных региональных разломов;
- 4) поиски крупных положительных структур на уровне продуктивной стратиграфической толщи пород;
- 5) выделение площадей с улучшенными коллекторскими свойствами;
- 6) поиски ловушек различного типа (антиклинальные поднятия, тектонически и литологически экранированные ловушки);
- 7) картирование соляно-купольной тектоники;
- 8) поиски рифовых построек;
- 9) поиски палеодолин в продуктивной стратиграфической толще;

10) поиски зон доломитизации в продуктивной известковистой толще;

11) определение продуктивности выявленных сейсморазведкой структур (определение наличия углеводородов в ловушке);

12) использование лунно-солнечных вариаций удельного электрического сопротивления для определения уровня водонефтяного (водогазового) контакта;

13) поиски благоприятных условий для создания подземных газохранилищ и определение степени заполнения газохранилищ;

14) 4D-электроразведка, контроль движения водонефтяного (газового) контакта в процессе добычи нефти и газа или эксплуатации подземных газохранилищ;

15) детальное изучение верхней неоднородной части разреза для введения поправок в 3D-сейсморазведку;

16) картирование осадков, перекрытых мощными эфузивными толщами;

17) картирование зон несогласий – размыка продуктивного горизонта;

18) морские исследования для подтверждения наличия углеводородов в ловушке, обнаруженной сейсморазведкой.

*Электроразведочные технологии.* На первом этапе (40-50-е годы) применялись методы ВЭЗ и ДЭЗ. При этом исследователи сталкивались с серьезными трудностями на глубине более 2 км (большие разносы, слабый сигнал), а также при изучении разрезов с промежуточными высокоомными экранами [1]. Эти затруднения вызвали бурное развитие в Советском Союзе методов, основанных на изучении переменного электромагнитного поля. Три метода развивались параллельно, первый из них объединял группу методов, использующих естественное электромагнитное поле Земли. В этих методах использовалось измерение ортогональных горизонтальных электрических и магнитных компонент ЭМ-поля с последующей нормировкой электрического поля на ортогональную магнитную компоненту в точке измерений (методы МТП и МТЗ) или параллельную электрическую компоненту в закрепленной базовой точке (метод теллурических токов – ТТ). Последовательно от простого к сложному развивались ме-

тоды ТТ. Этим мобильным и производительным методом оперативно покрыты огромные территории на Украине, в европейской и азиатской частях России (Сибирь), в модификациях магнитотеллурического профилирования (МТП), магнитотеллурического зондирования (МТЗ) [1, 2]. Метод частотных зондирований предусматривает создание в земле электромагнитного поля переменной частоты с помощью мощной генераторной установки и заземленного электрического диполя и измерение в дальней и промежуточной экваториальных зонах источника гармонического сигнала для параллельной электрическому диполю горизонтальной электрической компоненты ( $E_x$ ) и производной вертикальной магнитной компоненты ( $\partial B/\partial t$ ) [4, 5, 13, 15]. Аналогичные компоненты измерялись в дальней зоне источника в методе ЗС. В отличие от метода ЧЭЗ, переменное ЭМ-поле в земле создавалось на одной достаточно большой частоте (период 10-30 с), причем в заземленный диполь подавались разнополярные импульсы с паузой, и сигнал становления поля измерялся в паузе [4]. Большой вклад в развитие методов ТТ, МТП и МТЗ внес М.Н.Бердичевский, а методов ЗС и ЧЭЗ – Л.Л.Ваньян и Б.С.Эненштейн, А.А.Жамалетдинов, А.П.Иванов, А.В.Куликов [4-7, 9].

В 50-е годы наибольшее распространение получил метод ТТ, поскольку использовал мобильные регистраторы электрического поля на фотобумагу и малогабаритные кварцевые часы для синхронизации записи в базовой и полевых точках. Длина регистрации поля составляла порядка 2 ч, что позволяло бригаде из двух-трех человек замерять несколько точек в день. Обрабатывались преимущественно вариации поля на периодах 50-150 с. Благодаря высокой производительности и маневренности метода (перемещение пеше, на вьюках, легких самолетах, вертолетах) этим методом были покрыты значительные территории. Напряженность электрического поля при высокоомном опорном горизонте обратно пропорциональна суммарной продольной проводимости ( $S$ ) осадков над ним. Поскольку над

поднятиями наблюдаются уменьшения значения  $S$ , то антиклинальные структуры идентифицировались именно по этому признаку. Привязка опорного горизонта осуществлялась по каротажу буровых скважин, позднее также и по данным МТЗ. Так как над структурами, содержащими залежи углеводородов, также наблюдается увеличение сопротивления пород порядка 10-30 %, то аномальный эффект над продуктивными антиклинальными структурами складывался и соответствовал разрешающей способности аппаратуры. Этот мобильный, производительный метод успешно применялся до конца 70-х годов, и главным его успехом можно считать открытие Уренгойской газоносной структуры [1, 2].

Методы ЗС и ЧЭЗ в промышленном варианте нашли применение для поисков залежей углеводородов начиная с 60-х годов [4-6], когда появилось первое поколение многофункциональной электроразведочной аппаратуры МТЛ-62 и МТЛ-71. Эта аналоговая аппаратура с регистрацией сигналов на фотобумагу имела пять каналов, два электрических и три магнитных. В качестве преобразователей (датчиков) магнитного поля использовались кварцевые магнитные вариометры, верхняя частота которых ограничивалась 0,1 Гц, что и определяло диапазон магнитотеллурических зондирований 10-1000 с, причем длинный период соответствовал длительности непрерывной регистрации поля. Кроме методов ТТ, МТП, МТЗ аппаратура также позволяла реализовать методы ЗС, ВП, ВЗЭ, ДЭЗ и в меньшей степени ЧЭЗ. Для метода ЧЭЗ была разработана специализированная аппаратура (СЧЗ-60 в нефтегазопоисковом варианте), включавшая мощный генератор 23 кВт и аналоговый регистратор, основанный на использовании избирательных усилителей для заданного набора частот. Для фазовых измерений осуществлялась передача опорной фазы питающего тока по радиоканалу [5, 13]. Специализированная аппаратура для метода ЧЭЗ, которая позволяла совмещать частотные ЭМ-зондирования с методом дифференциального фазового ВП (ЭВА-203б, ЭВП-203, ЭИН-204), активно использова-

лась для поисковых работ в 80-90-е годы «ВНИИГеофизикой» и «Днепрогеофизикой» (Днепропетровск, Украина) [6-9, 14]. Кроме того, в этот же период «Днепрогеофизика» активно использовала многофункциональную аппаратуру второго поколения (ЦЭС-2) для 3- или 5-компонентных ЧЭЗ-ВП. Измерения выполняли в дневное время, а в ночное время эта же аппаратура использовалась для записи МТЗ в интервале частот 0,1-600 с.

Метод ЗС в 50-60-е годы преимущественно применялся в дальней зоне. Источником контролируемого ЭМ- поля служил заземленный диполь длиной 2-8 км, приемником – горизонтальная петля [4]. Для регистрации поля использовалась многофункциональная аппаратура первого и второго поколений. Начиная с 70-х годов ЗС в дальней зоне вытесняется модификацией метода в ближней зоне, причем используется вариант «петля в петле». Для регистрации применяется многофункциональная аппаратура первого и второго поколений или специализированная типа «Цикл» или «Импульс».

С появлением у сейсморазведчиков метода общей глубинной точки электроразведочные методы стали заметно отставать по результативности от сейсморазведки, может быть, поэтому в 70-е годы появляется несколько технологий, которые можно объединить под общим названием «методы прямой индикации наличия углеводородов». Один из них был основан на попытке зафиксировать отраженное ЭМ-поле от высокомонной залежи на фоне низкоомного разреза. Однако метод оказался эффективен только над неглубокими залежами в относительно простых геоэлектрических разрезах. Подобная модификация, только на более высоком уровне, применяется норвежскими и британскими геофизиками в морском варианте для оценки наличия углеводородов в открытых сейсморазведкой антиклинальных структурах.

Метод, фиксирующий эпигенетические изменения над залежью углеводородов, был предложен В.В.Кукурузой, получил название ССП и в течение длительного времени с переменным успехом использовался на тер-

ритории бывшего СССР и возникших на его пространстве стран [14].

Метод многофункционального анализа многокомпонентных характеристик ЭМ-поля контролируемого источника был предложен Эриком Дзвинелом (Вега-Д), однако этот метод также давал неоднозначные результаты [6].

Метод, основанный на использовании изменений плотности и удельного электрического сопротивления под действием лунно-солнечного притяжения, не получил широкого распространения из-за ограниченной точности аппаратуры того времени (80-90-е годы). Однако со специализированной аппаратурой ЭВП-203, ЭИН-204 метод измерения вариаций удельного электрического сопротивления был успешно опробован в варианте ЧЭЗ в России, штатах Иллинойс и Техас (США) А.В.Куликовым и А.С.Горюновым, а также на Украине А.И.Ингеровым [14].

Метод вызванной поляризации оказался эффективным инструментом. Используемый на территории бывшего СССР вариант установки срединного градиента с измерением параллельной или ортогональной электрических компонент поля оказался более производительным и дешевым, по сравнению с применяемыми на Западе дипольными установками [7-9].

В то же время несколькими группами в СССР в 70-80-е годы были начаты разработки так называемых высокоразрешающих технологий электроразведки с контролируемым источником. Созданием кинематических технологий с построением и анализом годографов становления поля занимались в Киевском государственном университете А.А.Гроза и Н.В.Рева на базе аппаратуры второго поколения [14]. Сразу несколько групп разрабатывали высокоразрешающие технологии во временной области: «ВНИИ-Геофизика» [8-10], Институт геологии и геофизики (г.Саратов) [12], Институт океано-геофизики (г.Геленджик) [11].

В частотной области разработкой высокоразрешающих технологий занимались в Днепропетровском горном институте

и «Днепрогеофизике» (А.И.Ингеров, А.Л.Лозовой, В.П.Солдатенко) [6].

Для увеличения надежности получаемых результатов электроразведка часто комплексировалась с высокоточной гравиразведкой и магниторазведкой. Выделялись малоамплитудные гравитационные и магнитные аномалии как прямые индикаторы залежей углеводородов. При комплексной интерпретации использовались программы распознавания образов, многофакторного анализа. В некоторых случаях получены положительные результаты при применении элементов фазовых кривых ЧЭЗ, свободных от влияния поверхностных неоднородностей [3, 6, 14].

В результате развития аппаратурной базы, в первую очередь появления пятого поколения многофункциональной аппаратуры, стремительного развития программного обеспечения, вплоть до трехмерной инверсии, и богатого опыта, накопленного многими исследователями в самых разных геологических условиях с применением различных электроразведочных методик, сложилась оптимальная технология электроразведочных работ на каждой стадии геолого-разведочного процесса.

*Оптимальный комплекс электроразведочных методов.* Собственно в России, на Украине и в Узбекистане на основании многочисленных опытных работ сложились оптимальные комплексы традиционных электроразведочных методов, включающих МТЗ, ЗС в дальней или ближней зоне или ЧЭЗ, а также ВП. В других случаях – это высокоразрешающая электроразведка плюс ВП [8-10, 11]. При этом МТЗ использовался как опорный метод, однако его точность определения функций отклика (особенно в диапазоне 10-0,1 Гц), плотность сети и производительность были существенно ограничены возможностями громоздкой, смонтированной на тяжелом автомобиле аппаратуры второго поколения (ЦЭС-2, ЦЭС-3).

Методы с контролируемым источником (ЗСД-зондирование становлением в дальней зоне, ЗСБ-зондирование становлением в ближней зоне, ЧЭЗ в дальней и промежуточной зонах) использовались для сгущения

сети и получения более точных значений функций отклика для более однозначной интерпретации. Основной проблемой для сгущения сети была возможность проезда тяжелого автомобиля, на котором смонтирована регистрирующая аппаратура, к точке наблюдений.

Метод ВП служил для выделения аномалий вызванной поляризации. Разными организациями применялись различные модификации метода ВП, однако наиболее успешным был фазовый метод вызванной поляризации с измерением дифференциального фазового параметра [7].

*Комплексирование электроразведки с другими методами.* Наиболее успешно электроразведка комплексировалась с сейсморазведкой, инициатором оригинальной методики такого комплексирования выступил А.Н.Аллилуев (подразделение «Укргеофизики» в г.Новомосковске Днепропетровской области). Суть комплексирования заключается в фиксации с помощью сейсморазведки и электрокаротажа геоэлектрических границ, близких к стратиграфическим, и определение изменения электрических свойств в пластах между двумя соседними границами. Такой подход снижает неоднозначность решения обратной задачи электроразведки (сужает рамки действия принципа эквивалентности), позволяет более детально изучать геоэлектрический разрез, но требует наличия результатов сейсморазведки, предварительно проведенной на изучаемой площади.

Комплексирование электроразведки с высокоточной гравиразведкой и магниторазведкой также может быть продуктивным при отсутствии на площади сейсморазведки или недостаточной плотности сейсморазведочных данных. Такое комплексирование позволяет более однозначно классифицировать аномалии, проводить комплексную количественную интерпретацию, опираясь на пропорциональность между плотностью пород и их удельным электрическим сопротивлением. Такое комплексирование позволяет также более эффективно использовать программные комплексы, реализующие

технологию распознавания образов в многомерном пространстве.

*Пятое поколение многофункциональной электроразведочной аппаратуры.* Такая аппаратура обладает качественно новыми характеристиками, которые существенно отличают ее от предыдущих поколений многофункциональной или специализированной МТ-аппаратуры. Основными особенностями приборов пятого поколения являются:

- небольшая масса регистрирующего прибора (4,5 кг), прочный герметичный корпус, позволяющий проводить работы круглогодично в самых различных климатических условиях;
- малое энергопотребление, что дает возможность существенно снизить массу батарей питания;
- GPS-синхронизация, позволяющая с высокой точностью синхронизировать неограниченное число приборов, в полной мере реализовать технологию работ с одной или нескольких удаленных опорных точек для подавления ЭМ-помех, автоматическое точное определение позиции прибора в пространстве;
- наличие независимых 5- и 2-компонентных приборов, что позволяет при нефтегазопоисковых работах значительную часть полевых работ (50-90 % в зависимости от характера геоэлектрического разреза и масштаба съемки) проводить с помощью более производительных 2-канальных приборов;
- высокая степень автоматизации процесса регистрации МТ- поля, при которой отпадает необходимость в постоянном присутствии оператора при работе прибора, а также существенно снижаются квалификационные требования к операторскому составу;
- съемная твердотельная память большой емкости, устраниющая необходимость использования в точке регистрации компьютера, а также экономящая время на передачу данных с прибора в компьютер для обработки;
- 24-разрядный быстродействующий аналого-цифровой преобразователь (АЦП) на каждый канал;

• быстрая установка прибора в точке записи (бригада из трех-четырех человек может за день установить от 4 до 15 приборов в зависимости от рельефа местности, возможностей транспортировки и расстояния между точками);

• совмещение в одном приборе МТ- и АМТ-функций, что значительно расширяет область применения аппаратуры, позволяет обоснованно вводить статические поправки в данные, чтобы учесть влияние поверхностных неоднородностей; в случае высокомономной верхней части разреза АМТ может быть весьма полезно для введения статических поправок в 3D-сейсморазведку.

Преимущества использования аппаратуры пятого поколения следующие:

- ◆ высокая оперативность работ, экологическая чистота, отсутствие необходимости проезда тяжелого транспорта по профилям наблюдений;
- ◆ существенное повышение производительности работ;
- ◆ значительное улучшение качества и, в первую очередь, точности получаемых данных;
- ◆ существенное снижение себестоимости работ;
- ◆ возможность проведения работ в труднодоступной местности;
- ◆ эффективность выполнения детальных работ.

*Перспективы МТ-метода.* Появление пятого поколения аппаратуры (1996 г.) превратило метод МТЗ из одного из самых трудоемких и малопроизводительных в один из самых мобильных, производительных и высокинформативных при сохранении значительной глубинности исследований.

Этому способствовали:

• успешные нефтегазопоисковые работы, проведенные в нескольких странах, и в первую очередь в горных районах Китая, где ежегодно задействовано на поисках залежей углеводородов около 300 МТУ-приборов пятого поколения, благодаря такому размаху и быстрому прогрессу китайских геофизиков в технологии применения

метода получена впечатльная положительная статистика его применения;

• глубинные морские МТЗ в Мексиканском заливе, которые проводятся в производственном масштабе с 1994 г. с помощью аппаратуры, созданной в Океанографическом институте США;

• морские работы с донными МТ-станциями и контролируемым источником, инициированные компанией «Статойл» в 2000 г., которые в настоящее время успешно применяются норвежскими и британскими геофизиками по заказам многих нефтяных компаний.

Естественно, в нефтяных компаниях зались вопросом применения электроразведки, и в первую очередь МТЗ, не только на море, но и на суше. Этому способствовали и другие соображения:

- ◆ сейсморазведка достигла некоторого пика в своем развитии, и дальнейший прогресс требует существенных капиталовложений;
- ◆ МТЗ достигло значительного прогресса при несопоставимо меньших капиталовложениях, практически без ощутимого участия нефтяных компаний, и резервы дальнейшего его развития еще далеко не исчерпаны;

◆ сейсморазведка – достаточно дорогостоящий метод, аналогичная по плотности съемка МТЗ стоит от 0,1 до 0,5 от стоимости полевых сейсморазведочных работ; следует также принимать во внимание, что сроки и стоимость обработки и интерпретации сейсмических данных значительно выше, чем аналогичные показатели в МТЗ;

◆ далеко не все результаты бурения подтверждают сейсмические построения, и далеко не во всех случаях сейсморазведка может ответить на вопрос, содержит ли откартированная структура углеводороды или является пустой; в этих условиях дополнительная информация, которую может доставить электроразведка за умеренную цену, вполне целесообразна для принятия более обоснованных решений;

◆ предварительное МТЗ может выделить благоприятные объекты для сейсморазведки и тем самым сократить ее объемы;

◆ МТЗ может помочь построить более обоснованную скоростную модель, так как между удельным электрическим сопротивлением и скоростью существуют устойчивые связи;

◆ в некоторых районах использование сейсморазведки малоэффективно (базальтовые покровы, плотные известняки и т.д.);

◆ сейсморазведка испытывает серьезные трудности при выполнении работ в населенных районах, где оплаты потрав могут превысить стоимость съемки, в залесенных районах, районах с пересеченным рельефом, экологически чувствительных областях; реки, каналы, озера также представляют серьезную проблему для сейсморазведки; МТЗ гораздо легче преодолевает эти трудности.

Преимущества МТЗ перед другими электроразведочными методами заключаются в следующем:

- экологическая чистота;
- высокая мобильность;
- значительная глубинность;
- высокая информативность (тензорные измерения);
- возможность эффективного применения на всех стадиях поисково-разведочных работ при самых различных масштабах исследований;
- незначительная масса оборудования;
- незначительная площадь, требуемая для расстановки приборов;
- быстрота подготовительно-заключительных работ на точке измерений;

Себестоимость МТЗ определяется:

◆ количеством задействованных приборов (чем больше – тем дешевле; конечно, есть разумный предел, китайские контракторы, располагающие значительным парком аппаратуры, наиболее конкурентоспособны на мировом рынке);

◆ организованностью и тренированностью полевой команды;

◆ возможностью эффективно передвигаться по площади, профилю, чтобы время передвижения от точки к точке существенно не превышало продолжительность подготовительно-заключительных операций на точке;

◆ уровнем промышленных ЭМ-помех.

Магнитотеллурическое зондирование целесообразно комплексировать со следующими электроразведочными методами:

• прежде всего, с методом ВП, который поставляет независимую дополнительную информацию в распределении вызванной поляризации среды;

• с электрохимическими методами, если их эффективность в решении задачи выделения залежи достаточно надежна, производительность и себестоимость не изменяют в значительной степени общую себестоимость работ;

• с методами ЧЭЗ-ВП, CSMT(CSAMT), ЗС при сложном геоэлектрическом разрезе и (или) высоком уровне промышленных электромагнитных помех, ограничивающих точность МТЗ.

На стадии *региональных работ* электроразведка МТЗ по региональным профилям с шагом 0,5-1,0 км (в ряде случаев сопровождаемая площадной съемкой по сети  $5 \times 5$ ,  $2 \times 2$  км) решает задачи картирования осадочных бассейнов, выделения глубинных разломов, локализации площадей с повышенными коллекторскими свойствами продуктивных пластов, а также крупных антиклинальных поднятий. Даже в очень мелком масштабе (1:2500000), сравнивая карты суммарной продольной проводимости до-кембрийских осадков, карты модуля эффективного сопротивления с картой расположения уже открытых месторождений углеводородов, можно установить, что наибольшая плотность месторождений приходится на региональные области повышенной проводимости и градиентные зоны.

Опыт показывает, что *поисковые работы* МТЗ целесообразно проводить по системе профилей с шагом 100-200 м и расстоянием между профилями 300-500 м. Эти работы желательно комплексировать с легкими модификациями метода ВП с тем же или более густым шагом.

*Детальные разведочные работы* желательно проводить по 3D-сети, сопоставимой с сетью 3D-сейсморазведки. Плотность сети должна увязываться с размерами ловушек, а также сложностью геологического разреза. Некоторые возможные варианты: 100 × 200, 100 × 100, 50 × 100, 40 × 80, 50 × 25, 50 × 50,

40 × 40, 25 × 25 м. Детальные работы по возможности желательно комплексировать с методом ТТ.

*Морские* МТЗ с 1994 г. успешно проводятся в Мексиканском заливе с целью картирования соляных толщ. Морские донные зондирования с контролированным источником были инициированы норвежской компанией «Статойл» с целью повышения вероятности выделения продуктивных нефтегазоносных структур. Такой шаг нефтяной компании был обусловлен высокой ценой бурения на акватории, особенно в глубоководной части. В результате появилась технология, которую сейчас широко используют норвежские и британские геофизики для оценки продуктивности открытых сейсморазведкой структур. При выполнении съемки донные регистраторы ЭМ- поля располагаются вдоль профилей наблюдений, последовательно над каждым профилем протягивается питающий диполь, создающий ЭМ-поле в морской воде и нижележащих осадках. Диполь буксируется, как правило, в 100 м над морским дном, где установлены приемники. В качестве приемников могут использоваться 5- или 2-канальные МТ-приборы или более простая аппаратура. Интерпретация пока проводится по довольно простой схеме: полученные кривые сравниваются с моделью однородного полупространства, характерные отличия наблюденных кривых от этой модели принимаются за отражения ЭМ- поля от высокомоного пласта, в качестве которого выступает залежь углеводородов. Эта технология получила название «каротаж морского дна». Нефтяные и газовые компании, естественно, задаются вопросом: «Если эта технология работает в море, то почему бы не создать такую же технологию для суши?».

*Заключение.* На стадии региональных работ электроразведка МТЗ по региональным профилям с шагом 0,5-1,0 км (в ряде случаев сопровождаемая площадной съемкой по сети 5 × 5, 2 × 2 км) решает задачи картирования осадочных бассейнов, поис-

ков погребенных палеорифтов, выделения глубинных разломов, локализации площадей с повышенными коллекторскими свойствами продуктивных пластов, а также крупных антиклинальных поднятий (наиболее типичные примеры подобных работ – изучение Днепрово-Донецкой впадины, Украина, и Бухаро-Хивинского палеорифта, Узбекистан).

На стадии поисковых работ профильная съемка МТЗ с шагом 0,5 км (а лучше площадная по сети 0,5 × 0,5 км) позволяет оценить структурную обстановку, а также выявить характерные признаки наличия углеводородов, такие, как изменение электрических свойств 600-1200-метрового интервала пород над залежью углеводородов. Профильные работы, выполненные аппаратурой пятого поколения над газовыми месторождениями Аккум, Парсанкуль, Аллат, Кувачи, Чаганкуль и Тегермен, четко указывают, что при использовании современной МТ-аппаратуры и программных средств над залежами углеводородов фиксируются четкие изменения электрических свойств, причем в толще пород над залежью контуры аномалий близки к контуру залежи.

Детализация аномалий выполняется в зависимости от конкретных условий методами МТЗ, ЗС, ЧЭЗ-ВП, CSAMT с шагом 40-500 м. Аномалии вызванной поляризации служат дополнительным критерием наличия углеводородов.

Профильные работы МТЗ с шагом 50-100 м в юго-восточном Онтарио позволяют детально картировать элементы тектоники и зоны доломитизации в известняках, с которыми связаны залежи углеводородов. Съемки МТЗ и CSAMT показали здесь высокую эффективность при поисках рифовых построек. Детальные 3D-съемки методом МТЗ (40-80 м) проводились при подготовке отработанных нефтяных залежей под газохранилища. В целом детальная 3D-электроразведка становится стандартом при решении задач нефтегазовой геологии.

В провинции Саскачеван проводился первый опыт 4D-электроразведки на нефть.

Применение при полевых съемках аппаратуры пятого поколения, отличающейся малогабаритностью, большой точностью и высоким уровнем автоматизации, а также возможностью выполнять одним видом регистраторов работы с различными технологиями (методами электроразведки) внесло существенные положительные изменения в производительность, себестоимость и результативность электроразведочных работ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Бердичевский М.Н.* Электрическая разведка методом магнитотеллурического профилирования. М.: Недра, 1981.
2. *Бердичевский М.Н.* Магнитотеллурическое зондирование горизонтально однородных сред / М.Н.Бердичевский, В.И.Дмитриев. М.: Недра, 1991.
3. *Бойко А.З.* Прогноз залежей углеводородов в Днепрово-Донецкой впадине с использованием метода распознавания образов / А.З.Бойко, Л.П.Бугримов, А.И.Ингеров // Докл. Украинской АН. Геологические, химические и биологические науки. 1988. № 12.
4. *Ваньян Л.Л.* Основы электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1965.
5. *Иванов А.П.* Частотные электромагнитные зондирования. М.: Недра, 1983.
6. *Ингеров А.И.* О точности картирования высокомного опорного горизонта методом частотных электромагнитных зондирований / А.И.Ингеров, В.П.Солда-

тенко // Докл. АН Украины. Математика, природа, техника. 1998. № 12.

7. *Куликов А.В.* Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации / А.В.Куликов, Е.А.Шемякин. М.: Недра, 1978.

8. Новые геофизические технологии прогнозирования нефтегазоносности. М.: Научный мир, 2001.

9. Пространственные методы исследований при использовании электроразведки для поисков нефтегазовых месторождений / А.В.Куликов, И.А.Безрук, Е.С.Кисилев, А.С.Сафонов, А.С.Горюнов // Новые разработки в области детальных геофизических исследований на нефть и газ. М.: Нефтегеофизика, 1985.

10. *Сафонов А.С.* Высокоразрешающая электроразведка (аномальные явления, регистрируемые переходными характеристиками электромагнитного поля). М.: АОЗТ «Геоинформмарк», 1995.

11. *Сочельников В.В.* Основы теории естественного электромагнитного поля в море. Л.: Гидрометиздат, 1979.

12. *Тикишев В.В.* Электромагнитная разведка повышенной разрешенности методом становления с пространственным накоплением. М.: Недра, 1989.

13. *Шевнин В.А.* Определение и учет искажений кривых частотного зондирования и становления поля, вызванных глубинными неоднородностями // Региональная разведочная и промысловая геофизика / ВИЭМС. М., 1973. № 13-14.

14. Электромагнитные технологии для поисков нефти и газа в Днепрово-Донецкой депрессии / А.И.Ингеров, Л.П.Бугримов, А.И.Голик и др. // Электромагнитная индукция в верхней части земной коры. М.: Наука, 1990.

15. *Эненштейн Б.С.* Методика интерпретации трехслойных кривых электромагнитных зондирований // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1966. № 9.