

Перспективы морской электроразведки при поисках углеводородов

- Тулупов А.В., Московский физико-технический институт, г. Москва
- Кяспер В.Э., Лисицин Е.Д., Петров А.А., ООО «МЕМ», г. Санкт-Петербург
- Лобковский Л.И., Рогинский К.А., Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

В статье рассматриваются предпосылки и результаты применения морской электроразведки при поисках углеводородов. Накопленный мировой опыт свидетельствует о значительном повышении коэффициента успешности бурения при использовании информации, предоставляемой электроразведкой. Описываются методики, позволяющие как расчленять разрез по сопротивлению, так и выделять зоны с аномальными поляризационными свойствами, вызванными эпигенетическими изменениями под воздействием углеводородов. Анализируются наиболее перспективные направления развития технологии.

Данная статья посвящена рассмотрению перспектив повышения геолого-геофизического прогноза перед проведением разведочного бурения на присутствие углеводородов с помощью морских технологий электроразведки.

Первые опыты применения морской электроразведки, направленные на поиски углеводородов (УВ), относятся к середине 70х годов прошлого века. Тогда в Санкт-Петербурге (ГНПП "Севморгео", затем ООО "СМГ-Электро") был разработан аппаратно-методический электроразведочный комплекс АМЭК, который обеспечивал в движении зондирование становлением электрического поля (метод ЗС) при поисках УВ. С некоторыми перерывами, связанными с экономическими особенностями того периода, метод успешно развивался и к середине 90х годов практически приобрел современные очертания. Оработка методики происходила на месторождениях Черного и Баренцева моря. В 2002 г. эта методика совместно с ООО СГНПК (г. Иркутск) была дополнена дифференциальными измерениями и в таком виде в некоторой степени применяется до настоящего времени для выявления аномалий вызванной поляризации (ВП). В конце 90х – начале 2000х несколько

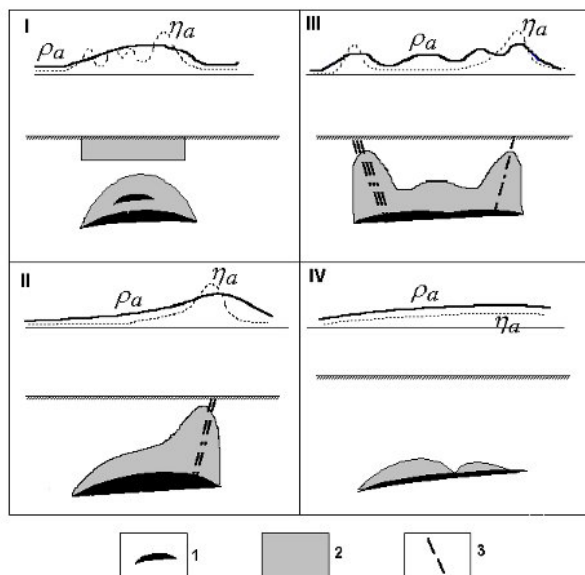
западных компаний (EMGS (Норвегия), ОНМ (Великобритания), ExxonMobil и Schlumberger (США)) практически одновременно начали проводить глубоководные поиски УВ с посредством дистанционных зондирований осевой диполь-дипольной установкой (Controlled Source EM).

Что можно ожидать от электроразведки следует из физико-геологических моделей залежи УВ, показанных на рис.1, взятом из работы Р.С. Сейфулина [1]. Модели включают следующие основные элементы:

- повышение сопротивления среды в области залежи и перекрывающих ее пород, претерпевших эпигенетические изменения под воздействием миграции УВ из залежи;
- повышение поляризуемости в тех же объемах среды,
- факторы, осложняющие возможность миграции (наличие слабопроницаемых пород, тектонических нарушений и т.п.)

В зависимости от сочетания этих и других факторов система включает следующие основные модели (I-IV, рис.3):

I. Миграция УВ над залежью достигает верхней части разреза (ВЧР), где встречаются скопления битумов и озокерита.



▲ Рис. 1. Геоэлектрические модели залежей углеводородов [1]: 1 - залежь углеводородов; 2 - зоны эпигенетических изменений; 3 - разрывные нарушения.

Эпигенетические изменения охватывают огромные объемы пород над залежью и достигают поверхности. Наблюдаются интенсивные аномалии ВП и существенное повышение сопротивления.

II. Эпигенетические изменения развиваются наиболее интенсивно по какому-либо предпочтительному направлению, например, по разлому, секущему залежь в ее периферической части. Над такой моделью фиксируются аномалии повышенного сопротивления, ВП и ЕП, протягивающиеся узкими линейными полосами, нередко смещенными относительно проекции залежи.

III. Эпигенетические изменения охватывают несколько сотен метров над залежью, но по ослабленным периферическим зонам проникают гораздо выше, нередко также достигая поверхности. В этом случае наблюдаются кольцевые аномалии повышенного сопротивления, ВП и ЕП.

IV. Залежь УВ расположена на большой глубине и перекрыта слабопроницаемыми породами. Вследствие этого эпигенетические изменения не охватывают ВЧР

и электрические аномалии над залежью на поверхности не наблюдаются.

Аналогичные модели разрабатывались Ю.С. Корольковым [2]. Подобные закономерности выявили и исследования американских геофизиков [3].

Из исследований Ю.А. Семина и др. [4] следует, что сама залежь УВ обособлена в среде по всем физическим и химическим параметрам. С точки зрения электроразведки, наиболее важным здесь является повышение удельного сопротивления на 100–500 Ом-м по сравнению с вмещающей средой и повышение поляризуемости на 5–10%. Следует отметить, что связь между нефте-газо-насыщенностью горной породы и её УЭС (выражаемую, например, с помощью закона Арчи) используется в скважинной электроразведке практически с момента её появления [5].

Ближняя зона (БЗ) - первая сотня метров разреза перекрывающих и подстилающих пород, подвергшаяся интенсивной переработке под воздействием потока УВ, что обеспечило образование зон вторичной минерализации ("запечатывающие слои", сульфидизация и др.), зону плотного УВ-ореола, зону обогащения элементами металлов. БЗ усиливает или ослабляет аномальный эффект от залежи УВ и по всем физическим и химическим параметрам может рассматриваться как контрастная неоднородность среды. БЗ также характеризуется повышенной поляризуемостью, но изменения удельного сопротивления здесь могут быть как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения.

Дальняя зона (ДЗ) - толща перекрывающих пород вплоть до дневной поверхности (с прилегающими слоями атмосферы), которая включает "зону окисления", зону дробления, зону сульфидизации, зону рассеянных УВ, приповерхностную зону обогащения элементами металлов в

подвижной форме, ореолы пропаноокисляющих бактерий и др. ДЗ выступает как неоднородность среды, создающая локальный аномальный эффект в геофизических и геохимических полях, и, в частности, в увеличении поляризуемости.

В целом залежь УВ фиксируется по периферии субвертикальными "ослабленными" зонами.

Таким образом, поисковыми признаками для электроразведки могут служить увеличение сопротивления в районе залежи и рост аномального отклика ВП в геоэлектрических слоях, приуроченных, в первую очередь, к ВЧР.

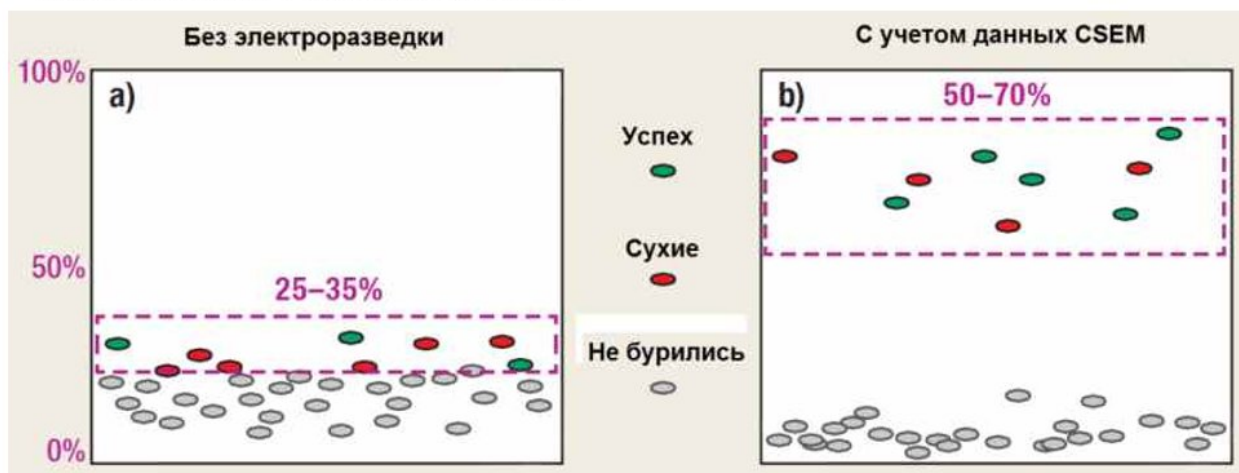
Западными компаниями за последние 10 лет выполнено более 700 морских коммерческих проектов с целью выявления залежей УВ [6]. Подавляющее большинство – глубоководные дистанционные зондирования методом CSEM для получения информации о распределении удельного электрического сопротивления пород. В разработках иностранных компаний отсутствует направленность на изучения эффектов ВП. Возбуждение и обнаружение эффектов ВП в глубоководных районах требует специальной технологии, а дистанционные частотные зондирования не обеспечивают такой возможности. Несмотря на это,

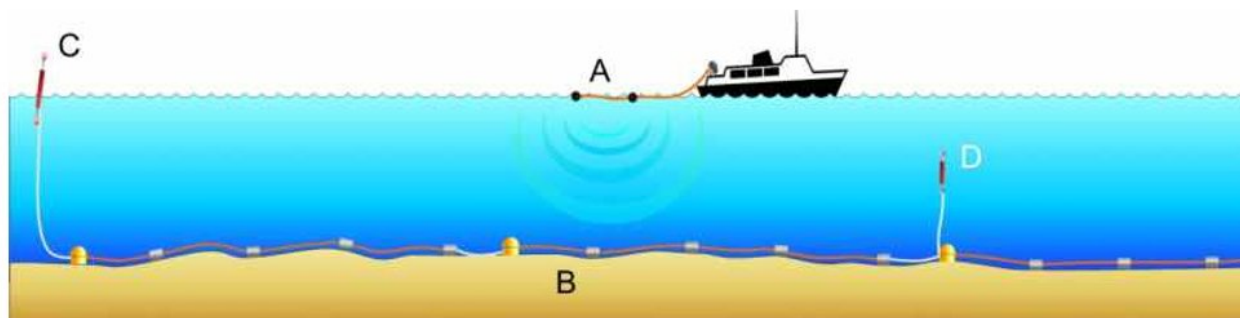
статистика на основании результатов бурения 86 скважин, приведенная в работе [7], показывает значительное увеличение коэффициента успешности бурения за счет учета данных электроразведки (рис.2).

Сигналы становления поля чувствительны как изменению электропроводности разреза, так и к изменению поляризуемости пород в ВЧР. При наличии ВП теряется "классическая" связь сигнала на определенном времени с глубиной проникновения поля. При этом существенно различное затухание полей после выключения тока позволяет картировать в плане аномальные зоны. Проводить тонкое расчленение разреза в таких случаях возможно либо при наличии опорных скважин, либо при наличии измерений, мало зависящих от ВП.

Такими измерениями, как отмечалось выше, могут служить дистанционные зондирования. Именно поэтому в ЗАО "ЕММЕТ" (Москва, С.-Петербург) для сравнительно небольших глубин, характерных для северо-восточной части Каспия, разработана технология морских измерений с донными станциями и поверхностным возбуждением горизонтальной линией (коммерческое название "Transient in Transition" - *TinT*®),

▼ Рис. 2. Повышение коэффициента успешности бурения за счет использования данных электроразведки с донными станциями





▲ Рис. 3. Схема проведения работ по технологии TinT. А – поверхностная или притопленная питающая линия; В – приёмные системы, уложенные гирляндой; С-плавучий концевой буй; D-притопленный концевой буй.

сочетающая как дистанционные зондирования, так измерения становления поля (рис.3).

Во время проведения работ на дно вдоль профиля наблюдений укладываются приёмные косы с подсоединёнными донными станциями (измерительными системами). Затем судно-источник курсирует по профилям, буксируя питающий диполь, после чего измерительные системы поднимают. Донные косы могут быть уложены на глубинах вплоть до нескольких сотен метров.

Длина донных кос обычно составляет 500 м. Питающая горизонтальная линия буксируется по поверхности. Её длина обычно составляет 500 м, что, при силе тока 500 А, даёт момент 250 к·Ам. Разрез возбуждается током переменной полярности (режим: плюс, пауза, минус, пауза). Длительность импульсов и пауз обычно равна 4 с, длина цикла 16 с. Полученные данные обрабатываются как данные дистанционного зондирования (аналогично CSEM) на ведущей частоте 1/16 Гц и на нескольких кратных нечетных гармониках, присутствующих в сигнале. Низкая частота позволяет оставаться в ближней и смешанной зонах электромагнитного источника даже на больших разносох. Во время тестовых работ в Каспийском море диапазон использованных разносов составил от 0,5 км до 10-12 км. В результате инверсии были получены разрезы

УЭС до глубин 3-5 км. Измерения в токовой паузе могут быть также интерпретированы как данные становления поля. С учётом модели УЭС, полученной в результате инверсии дистанционных зондирований, сигналы становления поля в некотором диапазоне разносов (например, 750 м - 3000 м) могут быть использованы для оценки степени влияния ВП. Обычно эта процедура заключается в подборе поляризуемости η одного из слоев в самой верхней части разреза при остальных фиксированных параметрах в рамках модели Коула-Коула.

Для работ методом TinT используются автономные донные станции, разработанные в ЗАО «ЕММЕТ». Каждый канал станции представляет собой 24-х разрядный АЦП с предусилителем. Все четыре АЦП управляются микроконтроллером, который обеспечивает задание параметров регистрации и запись результатов измерений на энергонезависимую память. Учитывая, что при работе в транзитной зоне возможны значительные колебания температуры, станции снабжены высокоточными термостабилизированными опорными генераторами. Питание станций осуществляется от аккумуляторов значительной емкости, что обеспечивает автономную работу станции до двух недель. Это позволяет работать в сложных метеоусловиях, когда между постановкой станций и их

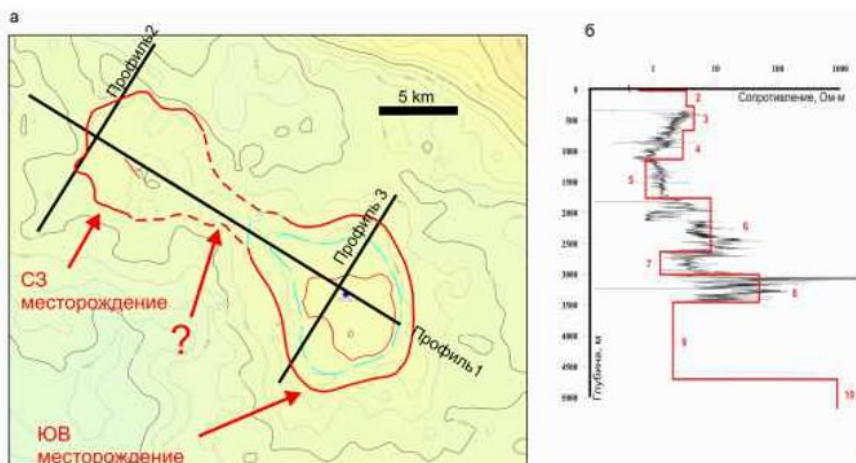


▲ Рис. 4. Процесс подготовки кабельной приёмной системы к работе (слева) и внешний вид регистратора (справа)

подъемом может пройти значительное время. Подзарядка аккумуляторов может производиться без вскрытия корпуса станций. Конструктивно станции выполнены в массивных корпусах из алюминиевого сплава, что обеспечивает устойчивость станций на дне в условиях волнения. Каждая станция снабжена двумя герморазъемами, один из которых используется для подключения электроразведочной установки, а второй – для инициализации станции и подзарядки аккумуляторной батареи. Внешний вид станций представлен на рисунке 4.

Ниже приводится пример эффективного применения морской электроразведки для решения геологических задач, связанных с поиском УВ. Полевые дан-

ные были получены во время работ на нефтегазовом месторождении в Каспийском море в 2009-20010 гг. Глубина моря на участке составляла 16-20 м. На рис.5а приведён контур месторождения и профили, на которых были выполнены измерения. Расстояние между приёмниками составляло 500 м. Продуктивной является карбонатная толща верхнеюрского возраста J_2 , соответствующая 8-му слою составленной геоэлектрической модели. Глубина залегания кровли J_2 составляла ~ 3.1 км, суммарная мощность продуктивной пачки ~ 400 м. В разрезе имеется несколько газоконденсатных и нефтяных залежей. Каротажная колонка и соответствующая ей геоэлектрическая модель приведены на рисунке 5б.



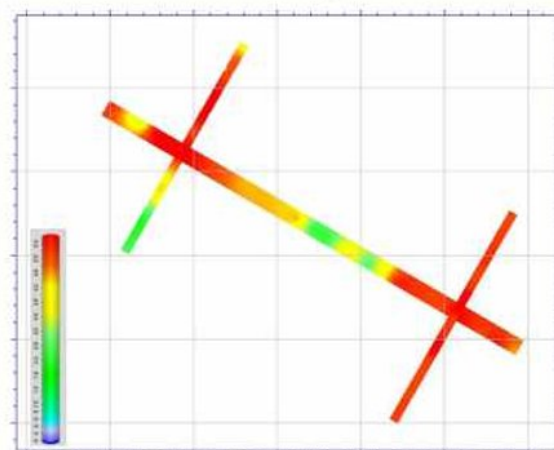
◀ Рис. 5. а) Контур месторождения, профили измерений, б) пластовое сопротивление по данным бокового каротажа и стартовая модель.

Обработка измерений выполнялась в два этапа. На первом этапе была выполнена инверсия дистанционных зондирований для получения модели УЭС. Дистанционные зондирования на больших разнотах слабо чувствительны к эффектам ВП.

Инверсия таких кривых позволяет определить УЭС среды без учёта поляризуемости пород. Границы основных горизонтов закреплялись по сейсмическим данным. В инверсии подбирались только УЭС модели. Закрепление структурных характеристик геоэлектрической модели по данным сейсморазведки является общепринятым приёмом. Это позволяет повысить пространственное разрешение электромагнитных измерений, которое само по себе существенно хуже, чем у сейсмических методов. На рис. 6а приведено распределение УЭС целевого слоя, полученного в результате инверсии. Повышение УЭС в северо-восточной и юго-западной частях участка пространственно совпадает с доказанными скоплениями УВ. Это даёт основание полагать, что в центральной области, где УЭС целевого слоя понижено, отсутствуют значимые скопления УВ, т.е. существует два независимых месторождения. На втором этапе обработки была проведена инверсия данных становления поля в рамках горизонтально-слоистой модели для уточнения параметров ВП. Мощности слоев и УЭС закреплялись в соответствии с моделью, подобранной ранее по дистанционным зондированиям. Постоянная времени τ и показатель степени s из формулы Коула-Коула – фиксировались и принимались равными 0.5 с и 0.5, соответственно. Во время инверсии подбирались только значения поляризуемости η в 3-ем слое модели. На всех станциях в использованном диапазоне разностей удалось добиться достаточно близкого

совпадения модельных и экспериментальных кривых (невязка в пределах 6%) в рамках единой модели для дистанционных и временных зондирований. На рисунке 6б показано финальное значение поляризуемости η третьего слоя. Полученные величины поляризуемости отражают интегральное влияние ВП на кривые становления поля, не отражают глубину аномалии и, таким образом, являются эффективным параметром, характеризующим плановое положение аномалии ВП. Полученные величины η на качественном уровне согласуются с указанным выше делением участка на три части. Можно предполагать, что уменьшение эффектов ВП в центральной части профиля 1 связано с отсутствием в этой зоне ореола пород, эпигенетически изменённых под действием УВ. Следует, однако, отметить незначительное превышение поляризуемости в аномальных зонах над фоновыми значениями, составляющими около 3%.

Интересные результаты были получены ЗАО «ЕММЕТ» при выполнении работ на лицензионном участке Чёрного моря, где в силу перепада глубин были исполь-



▲ Рис. 6а. УЭС целевого слоя, полученное в результате инверсии дистанционных зондирований. Цветовая шкала от 0,0 Ом (синий) до 54,0 Ом (красный). Шаг сетки – 5 км.

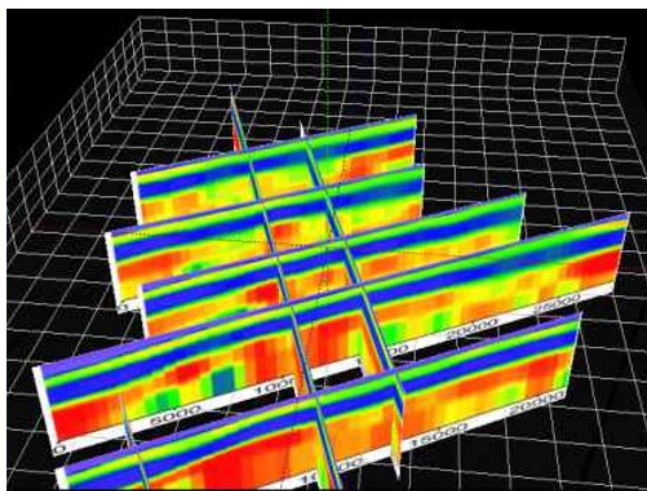
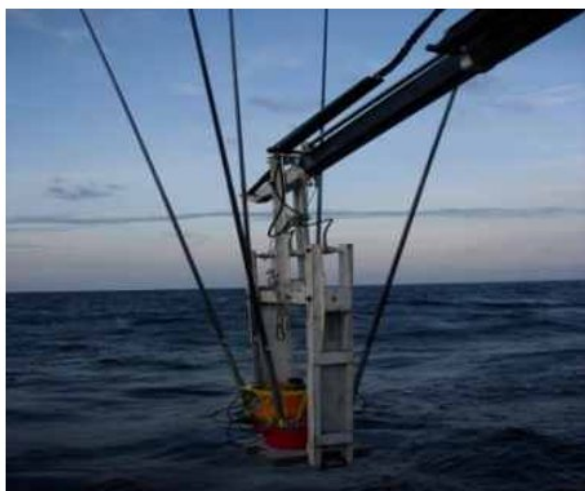


▲ Рис. 66. Поляризуемость третьего слоя, в данном случае отражающая суммарное влияние ВП на сигналы становления поля. Цветовая шкала приведена в долях единицы от 0,03 до 0,065.

зованы две технологии: с глубоководными самовсплывающими донными станциями (рис. 7а) и по технологии *TinT*®, результаты показаны на рис. 7б. При этом было показано, что технология с донными косами оказалась эффективной на существенно больших глубинах, чем первоначально предполагалась - вплоть до 200-300 м, и устойчивой по отношению к волновой помехе.

Можно констатировать, что происходит процесс превращения морской электроразведки из нового, малоизученного метода в штатное средство геофизического комплекса. Стандартизируются

форматы данных и процедуры их обработки, появляется возможность загрузки этих данных в известные программные пакеты, геологи-практики накапливают опыт их использования в своей работе. В настоящее время к сфере применения морской электроразведки относится, в первую очередь, непосредственная оценка перспективных структур по значениям УЭС, а также косвенная оценка по значениям аномалий ВП. В тех случаях, когда сейсморазведка оказывается неэффективна (перекрытые траппами толщи, подкрыльковые залежи и др.), электроразведка может быть использована для расчленения разреза. При этом предварительное моделирование для выяснения возможностей метода в условиях данного участка является важнейшим условием для её эффективного применения. Более того, авторы работы [8] после выполнения электроразведочных работ в Баренцевом море в объеме 39.000 кв. км в 2008-2013 гг. и анализа результатов бурения, проведенного до и после работ, приходят к следующему заключению: результаты электроразведки имеют определяющее значение, не только в смысле выбора места закладки скважины, но и в получении ответа на вопрос «где не надо



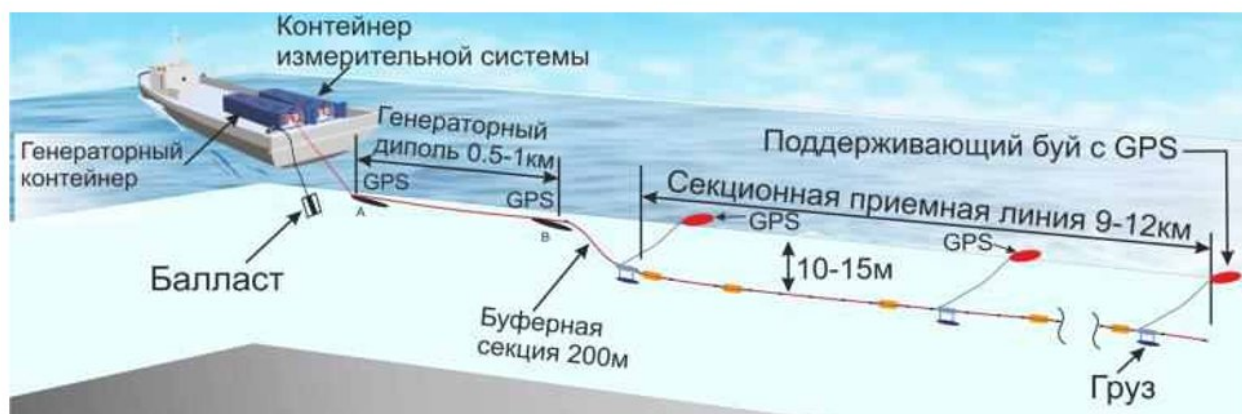
▲ Рис. 7 а) постановка глубоководных донных станций, б) разрезы УЭС.

бурить», несмотря на наличие позитивных сейсмических данных. Единственным основанием для закладки скважины в месте, где не обнаружена резистивная аномалия, может быть только «уверенность» в том, что залежь является слишком глубокой для ее обнаружения методами дистанционного ЭМ зондирования.

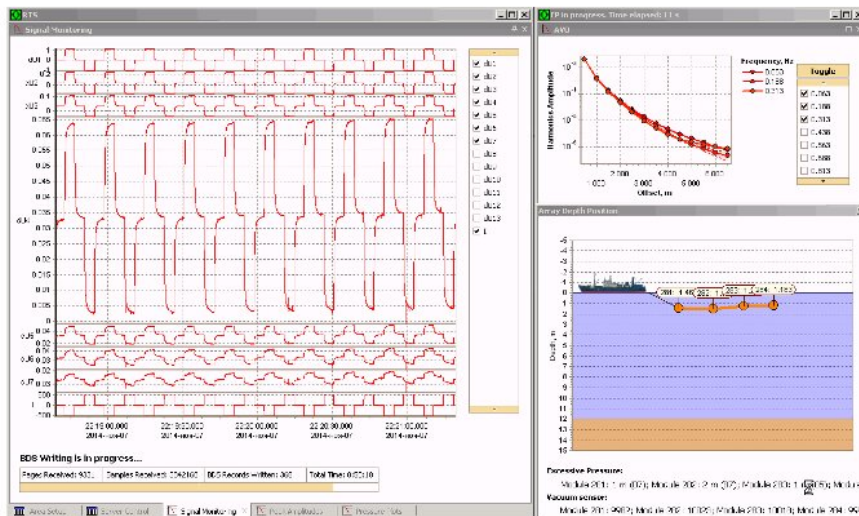
Тем не менее, возникает естественный вопрос: почему электроразведка, давая столь важные практические результаты, не развивается так же быстро в количественном и денежном выражении, как развивалась 3D сейсмическая разведка в 90-е годы? Ответ, по мнению авторов, находится на поверхности – в сегодняшнем техническом исполнении морские электроразведочные работы оказываются слишком дорогими. Являясь очень важной, но все же комплементарной технологией по отношению к 3D сейсмическим технологиям с плавающими косами, электроразведка оказывается по стоимости практически сопоставимой с сейсмикой. Выходом из этой ситуации в смысле адекватного практического развития этого направления является нахождение технических решений, которые бы без снижения качества результатов были бы эквивалентны по стоимости 2D сейсмической разведке.

Такое техническое решение было

найдено авторами патента [9], разработавшими аппаратный комплекс на основе буксируемой за судном многоэлектродной приемной линии – длинномерный многоразносный стример. Сигналы на парах приемных электродов, расположенных на приемной линии, измеряются одновременно во временном и частотном диапазонах как во время токовых импульсов, так и во время пауз между ними. Инверсия данных осуществляется также одновременно в частотном и временном диапазонах. В результате, достигается существенное повышение точности разведочных данных. Конструкция стримера показана на рис. 8. Начальную часть стримера составляет генераторная линия длиной от 500 до 1000 м, с силой тока до 1000 А. Генерируются дипольные импульсы тока с паузой между ними или меандр. Генераторный диполь буксируется у поверхности воды. Буферная секция сочленяет генераторный диполь и приемную линию. Приемная линия является секционной, давая, таким образом, возможность наращивать длину приемной косы в зависимости от глубины залегания предполагаемого коллектора. Каждая секция имеет длину 1500 м, на ней располагается цифровой 4-х канальный модуль с тремя парами неполяризуемых электродов. Расстояние между



▲ Рис. 8. Конструкция длинномерного многоразносного стримера



▲ Рис. 9. Пример записи измеряемых величин в реальном времени. Также в реальном времени фиксируется положение стримера.

электроды в паре составляет 500 м. Вся измерительная установка, следовательно, представляет собой набор отрезков длиной по 500 м, причем производится синхронное измерение сигналов на всех отрезках. Сигналы измерительных каналов можно суммировать, получая виртуальный канал с большей измерительной базой. Четвертый канал в каждом цифровом модуле является контрольным, он измеряет тестовый сигнал известной амплитуды и формы.

В 2014 году усилиями коллективов ООО «МЕМ» (правопреемник ЗАО «ЕММЕТ») и Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН удалось реализовать

это техническое решение и провести морские опытно-методические работы, продемонстрировавшие полноценную функциональность комплекса (Рис. 9).

В аналогичном направлении развивают морскую электроразведку специалисты компании Petroleum Geo-Solutions (PGS, Норвегия). Однако российская разработка обладает тем принципиальным преимуществом, что она основана на мобильных модульных контейнерных решениях и, таким образом, не требует использования специализированных судов, легко транспортируется, существенно сокращает время мобилизации и т.п. Необходимо лишь иметь достаточное

► Рис. 10. Расположение оборудования на корме судна. Каспийское море, осень 2014 г.



место на корме для размещения 2-х стандартных 20-ти футовых морских контейнеров, контейнера-лаборатории и дизель генератора (Рис. 10).

Комплекс дает возможность проводить работы при глубинах моря 15-500 метров, покрывая, таким образом, практически все российские акватории, за исключением транзитных зон. Вместе с тем, российский шельф во многих местах является мелким, имеются обширные перспективные транзитные зоны (Рис. 11).

Как правило, эти территории представляют собой слабоизученные геофизическими методами площади, что является следствием недостатка адекватной сейсмической и электроразведочной аппаратуры. В то же время, в основном, они расположены вблизи существующих элементов нефтегазовой и транспортной инфраструктуры. Этот факт, в совокупности с развитием технологий наклонных и горизонтальных скважин, делает их

последующую разработку рентабельной, даже при относительно небольших ценах на нефть. Учитывая специфику транзитных и мелководных зон, серьезных альтернатив технологии *TinT*® нет. Но при этом она должна подвергнуться существенной переработке в части дизайна станций, удобства и скорости зарядки и скачивания информации, превращения контейнерного решения из средства перевозки в контейнер – лабораторию (компьютеризованный контейнер), аналогично тому, как это уже реализовано в донной сейсмике [11]. Прототипы четырехканальных электроразведочных станций нового поколения для транзитных зон уже созданы (Рис. 12). При этом уровень шумов точных каналов составляет 1-2 нВ/√Гц.

Также должна быть значительно – до 60-80 км в сутки – увеличена производительность выполнения работ за счет разработки инновационных спуско-



▲ Рис. 11. Высокперспективные (красная линия) и ограниченно-перспективные (желтая линия) транзитные зоны шельфа России: 1 – Балтийская; 2 – Мезенская; 3 – Колгуевско-Печорская; 4 – Ямало-Гыданская; 5 – Южно-Лаптевская (Усть-Хатангская и Усть-Ленская); 6 – Яно-Индигоирская; 7 – Анадырская; 8 – Восточно-Камчатская; 9 – Западно-Камчатская; 10 – Сахалинская; 11 – Западно-Каспийская; 12 – Азово-Таманская [10].



▲ Рис. 12. Станция нового поколения «Turtle-E» и компьютеризированная стойка.

подъемных механизмов и технологии производства работ. Эта потребность определяется, в первую очередь, необходимостью выполнения больших объемов работ в условиях ограниченного полевого сезона.

Литература

1. Сейфулин Р.С., Портнягин Н.Э., Изотова О.В. Геоэлектрическая модель углеводородов Западной Украины: Советская геология, т. 3, с. 22-28, 1986.
2. Корольков Ю.С. Зондирование становлением электромагнитного поля для поиска нефти и газа. М.: Недра, 1987.
3. Sternberg, B.K. A review of some experience with the induced-polarization / resistivity method for hydrocarbon surveys: Successes and limitation. *Geophysics*, v. 56, p. 1522-1532, 1991.
4. Савицкий А.П., Семин Ю.А., Вешев С.А., Васильева В.И., Ворошилов Н.А., Альтшулер М.И., Алексеев С.Г. Нетрадиционные геофизические и геохимические методы поисков и разведки нефтегазовых месторождений / Геохимическое моделирование и материнские породы нефтегазоносных бассейнов. СПб, ВНИГРИ, 1998.
5. Ellis D.V., Singer J.M. *Well logging for Earth scientists*, Springer, p. 692, 2008.
6. Constable S. Ten years of marine CSEM for hydrocarbon exploration. *Geophysics*, v. 75, p. 75A67–75A81, 2010.
7. Ridyard D., Hesthammer J. Value creation using electromagnetic imaging. *World Oil*,

March, p. 51-54, 2011.

8. Fanavoll S., Gabrielsen P.T., Ellingsrud S. CSEM as a tool for better exploration decisions. *SEG, Interpretation*, v. 2, p. SH55-SH66, 2014.

9. Тулупов А.В., Лисицын Е.Д., Кяспер В.Э., Петров А.А. Аппаратурный комплекс для морской электроразведки нефтегазовых месторождений и способ морской электроразведки. Патент РФ № 2510052, 20.03.2014.

10. Верба М.Л., Герман Е.В., Григоренко Ю.Н. и др. Транзитные зоны акваторий России. Недра, СПб, 2005.

11. Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Тулупов А.В., Воронов М.А., Рослов Ю.В. Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации. *Морские информационно-управляющие системы* № 1 (7), с. 40, 2015.