

Технология и опыт применения становления электромагнитного поля под воздействием сейсмического облучения (СПСО) при поисках месторождений углеводородного сырья

А.Э. Берг, к.т.н., ООО, «Элкин», Санкт-Петербург.

1. Введение

Хорошо известно, что в мире бурится много пустых поисковых скважин. Каждая пустая скважина - это неоткрытое месторождение или продуктивная залежь, это огромные затраты и гигантские потери времени. Например, как на Яламе, так и на Курмангазы (Каспийское море), где уже пробурено по две пустых скважины, почти наверняка будут открыты промышленные запасы УВ, но при современной технологии поисков на это потребуются годы и млрд. денег. *Причина сложившегося положения одна - высокий уровень ошибок при селекции нефтегазовых ловушек на продуктивные и нет до начала бурения.*

Не секрет, что каждая продуктивная залежь имеет ловушку (антиклинальную, тектоническую, литологическую, стратиграфическую и т.п.), но не каждая ловушка имеет залежь. Сейсмика выделяет множество ловушек, разграничить которые на продуктивные и нет с достаточной точностью практически невозможно. В результате коэффициент успешности бурения в среднем по миру составляет 25%. Причем открываются продуктивные залежи преимущественно в сводах антиклиналей. Резервы в неструктурных ловушках на крыльях структур и в моноклиналиях практически остаются нетронутыми из-за невозможности обнаружить в них залежи.

Целью предлагаемой технологии метода селекции ловушек, основанной на бинарном сейсмо-электромагнитном эффекте в промышленных коллекторах УВ, впервые описанном А.Э. Бергом в патенте США № 7 303 790 с приоритетом от 5 октября 2005 г. [1], является снижение уровня ошибок при отборе под бурение ловушек примерно в два-три раза и обнаружение продуктивных залежей в моноклиналиях и на крыльях структур. Запасы в последних, как известно, достигают 50% от всех имеющихся запасов углеводородов в мире.

В 80-е годы было обнаружено [2], что при возбуждении акустического импульса одновременно с возбуждением электромагнитного импульса в коллекторах, содержащих промышленные скопления УВ, возникает электромагнитный отклик (эхо) связанный с взаимодействием этих импульсов в коллекторах. Это взаимодействие относительно недавно получило название “бинарный сейсмо-электромагнитный эффект - БСЭ эффект (BSE phenomenon)”.

Опыт показывает, что при воздействии только акустических импульсов детектируемые отклики сейсмо-электрического эффекта от залежей на поверхности земли наблюдаются только для залежей до глубин 300 м [3], в то время как отклики бинарного эффекта (БЭ) зафиксированы от залежей с глубиной более 5 км. Таким образом метод СПСО это электроразведка с одновременным облучением среды сейсмической волной. Технология СПСО в принципе может давать сейсмический временной разрез и геоэлектрический разрез, но это не главное - эти данные получают много и давно - СПСО инициирует и выделяет прямой отклик от залежи. А это позволяет выявить продуктивную залежь в ловушке любого типа, оконтурить ее, определить глубину залегания и оценивать предполагаемые запасы до начала бурения. Цель этой работы - показать как и почему это возможно.

2. Физические основы бинарного эффекта.

Осадочный чехол горных пород рассматривается как огромная пористая мембрана сложного строения. Эта мембрана заполнена флюидами различного состава и концентрации. Преобладающая часть чехла насыщена солевыми растворами с концентрацией 1-300 г/л. Небольшая часть пор заполнена рассеянными УВ. Последние иногда замещают солевые растворы в хорошо проницаемых коллекторах, образуя промышленные залежи УВ сырья. УВ имеют удельное электрическое сопротивление на 8-9 порядков выше, чем солевые растворы. Графически возникновение бинарного эффекта

проиллюстрировано на рис. 1.

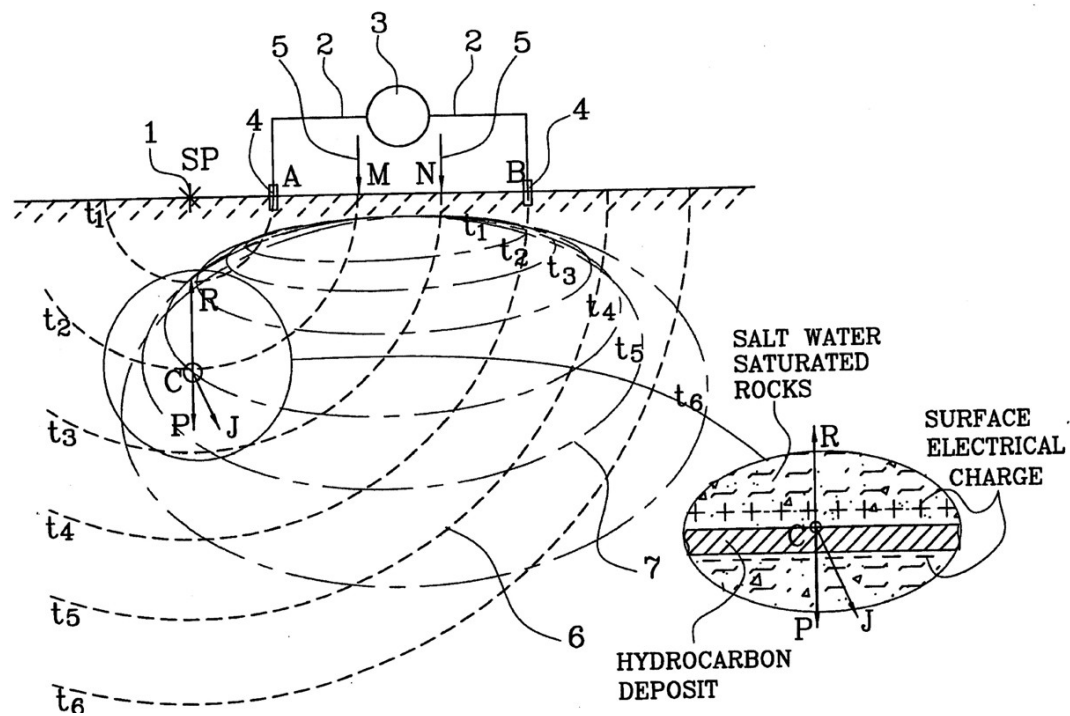


Рис. 1.

1- акустический источник в пункте взрыва SP, 2- кабель питающей линии, 3- импульсный генератор электрического тока, 4- питающие электроды, 5- приемные электроды MN.

Здесь показан поперечный разрез среды и типичное временное распределение сейсмической волны и электромагнитного поля в геологической среде.

На дневной поверхности изображена упрощенная схема возбуждения и измерения полей.

На врезке изображен коллектор (hydrocarbon deposit), несущий поверхностные заряды (surface electrical charge): сверху +, снизу -, водонасыщенная крышка (salt water saturated rocks) и условно показаны векторы: P - градиент давления акустической волны от источника 1, J - плотность электрического тока индуцированного кабелем 2 и R - электрический отклик коллектора на бинарное воздействие.

Одновременно созданные или с выбранной временной задержкой, акустические и электромагнитные колебания проходят через все породы чехла с различной скоростью и на различных временах в зависимости от расстояния до источников колебаний. Градиент давления P акустической волны вызывает смещение жидкой фазы относительно твердого скелета в хорошо проницаемых слоях (сейсмическая модель М.А. Biot [4]).

Электромагнитное поле распространяясь через слои с различным удельным сопротивлением заряжает границы раздела слоев стационарными электрическими зарядами [5,6,7]. Для коллектора с УВ на рис. 1 имеем следующее выражение для поверхностной плотности электрического заряда

$\sigma(t)$:

$$\sigma(t) = \epsilon_0 \epsilon (\rho_1 - \rho_2) J(t) \text{ и т.к. } \rho_1 \gg \rho_2, \sigma(t) = \epsilon_0 \epsilon \rho_1 J(t),$$

где $\epsilon_0 \epsilon$ - диэлектрическая постоянная среды,

$\rho_{1,2}$ - удельные электрические сопротивления коллектора с УВ и вмещающей среды, соответственно,

Отсюда видно, что именно на поверхности коллектора с УВ достигается максимальное значение плотности электрического

заряда $\sigma(t)$ из всех пластов с высокой проницаемостью.

Представляется, что взаимодействие акустических колебаний и стационарных электрических зарядов происходит вследствие указанного выше смещения жидкой фазы в поровом пространстве коллектора, которое разряжает его заряженную поверхность [1]. Этот заряд и генерирует отклик $J(t)$ бинарного эффекта, фиксируемый на поверхности земли. Согласно модели Biot смещение жидкой фазы происходит только в хорошо проницаемых пористых слоях и, кроме того, наибольшая плотность поверхностных зарядов наблюдается на поверхности высокоомных слоев. Только коллектора с УВ соответствуют этим условиям и в них будет наблюдаться максимальный бинарный эффект. Опыт показывает, что это именно так. Аналогичный эффект был получен С.А. Назарным и В.А. Комаровым (СПб Университет) [7] при моделировании на образцах.

Сигналы бинарного эффекта от реальных залежей УВ. В качестве природной модели для изучения бинарного эффекта в промышленных коллекторах была выбрана восточная газоконденсатная залежь месторождения Голицына (Украинский сектор Черного моря). На рис.2 приказан меридиальный геолого-геофизический разрез этого месторождения вблизи продуктивной скважины 4.

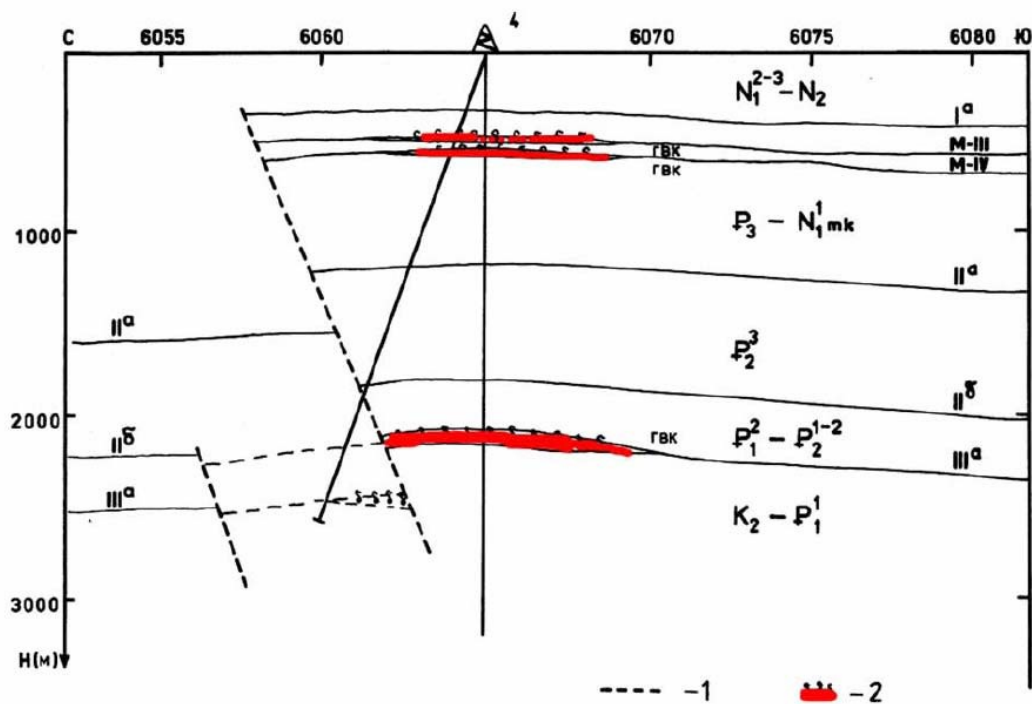


Рис. 2. 1 - Северо Голицынский разлом, 2 - газоконденсатные залежи.

Как видно из рис. 2. залежь имеет два продуктивных горизонта : верхний на глубине около 500 м залегает в терригенных отложениях майкопского яруса и нижний на глубине 2200 м в карбонатах нижнего палеоцена и верхнего мела. На рисунке пунктиром показаны тектонические нарушения и сплошными линиями сейсмические отражающие горизонты Ia, IIa, IIб и IIIa. Мощность верхнего продуктивного горизонта около 12 м, нижнего - 60м. Измерительная установка, показанная на рис.1., на первом этапе исследования располагалась южнее вне контура залежи на дне моря глубиной около 30 м. Судно становилось на якорь и производилось около 1000 накоплений сигналов с целью снижения уровня помех. Делалось 3 серии измерений при длительностях электромагнитного импульса 2, 5 и 10 сек. Затем эта же установка располагалась около продуктивной скважины и измерения повторялись в том же порядке. Аномальный сигнал вычислялся как разность первого и второго накоплений на каждом из времен длительности электромагнитного импульса. Полученный результат показан на рис. 3.

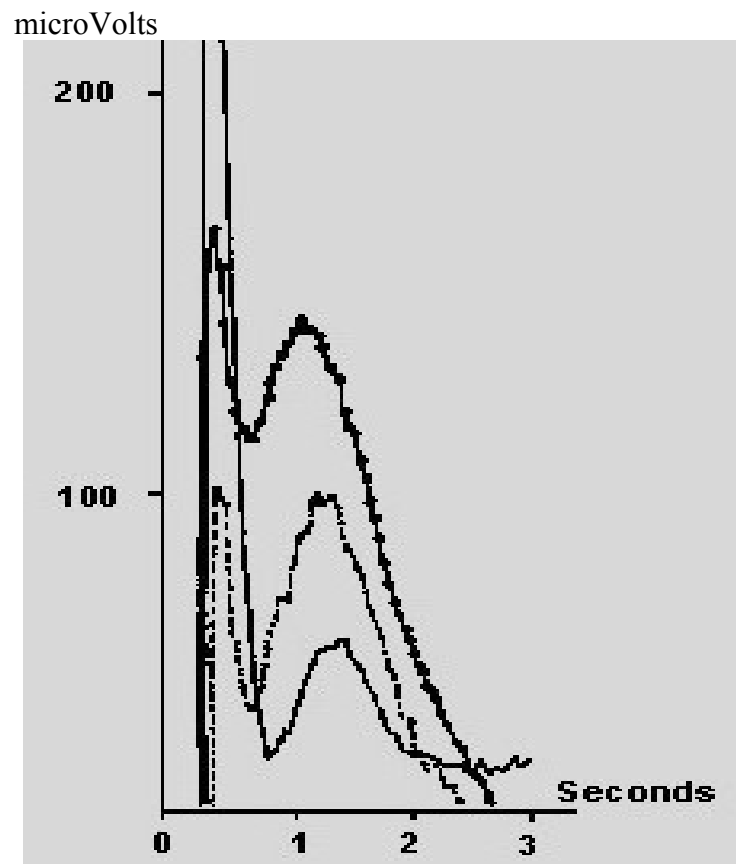


Рис. 3.

Здесь верхний отклик по времени 1 сек соответствует импульсу с длительностью 10 сек, средний - 5 сек и нижний - 2 сек. Из рисунка видно, что наиболее четкий сигнал зафиксирован для импульса 2 секунды. Отклик имеет два максимума : первый на времени 0,5 сек и второй - 1,4 сек. Решение прямой задачи для параметров разреза скважины 4 и предположения, что продуктивные залежи генерируют отклик на бинарное воздействие дало результат, показанный на рис. 4.

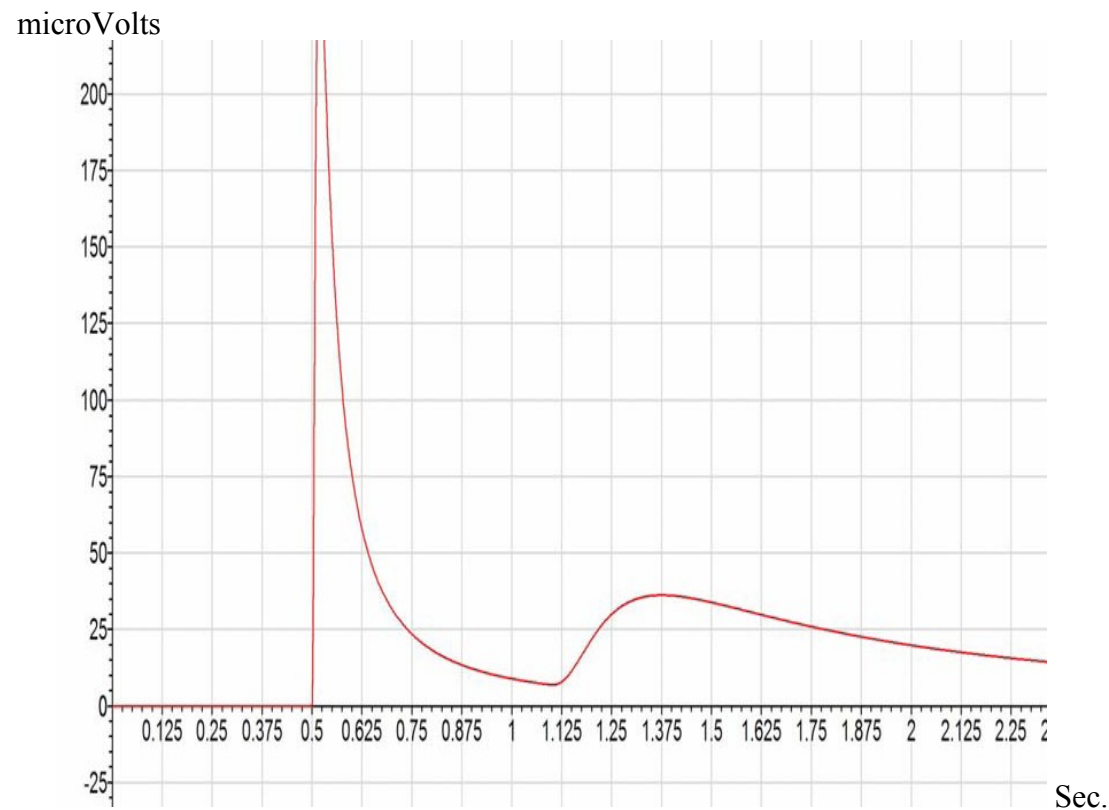


Рис. 4

Как видно из сравнения модельного графика рис.4. и нижнего графика рис. 3., полученного над залежью, они очень близки по форме. Таким образом было показано, что отклик от продуктивной залежи реально существует и может быть использован для поисков углеводородов. В дальнейшем было показано, что бинарная технология позволяет оконтуривать залежи и определять их глубину залегания.

3. Техническая реализация бинарной технологии.

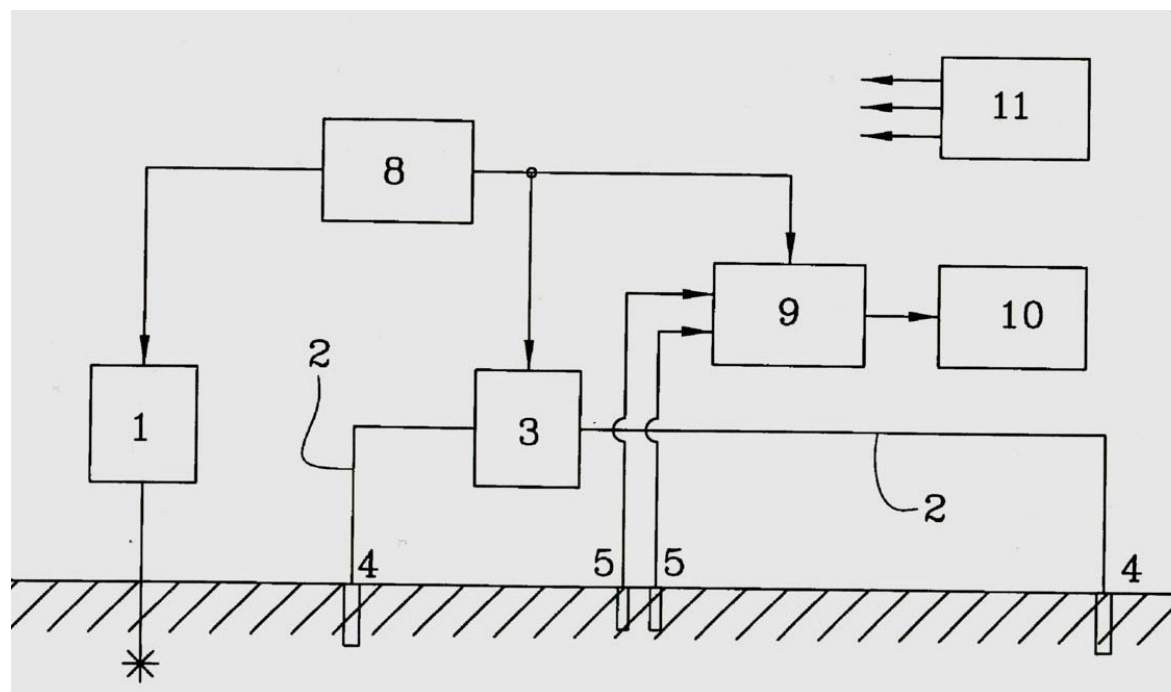


Рис. 5.

На рис. 5 показана блок-схема реализации системы для данной технологии согласно патенту [1]:
 Здесь : 1 -сейсмический источник, 2- кабель питающей линии, 3- импульсный генератор, 4- питающие электроды,
 5- приемные электроды, 8- синхронизатор, 9-микровольтметр, 10-персональный компьютер,
 11-первичный источник электрической энергии.

Когда указанные на рис 5 элементы соединены, синхронизатор 8 посылает сигнал запуска в сейсмический источник 1, импульсный генератор 3 и микровольтметр 9. Включение импульсного генератора может быть задержано (по желанию оператора) на заданное время. Изменение этого времени позволяет сканирование геологического разреза по глубине. Отклики , которые инициируются в залежах, распространяются вверх и детектируются с помощью приемных электродов. Прием и обработка сигналов осуществляется цифровым микровольтметром и персональным компьютером. Геометрическое расположение источников и приемников выбирается исходя из геологических задач.

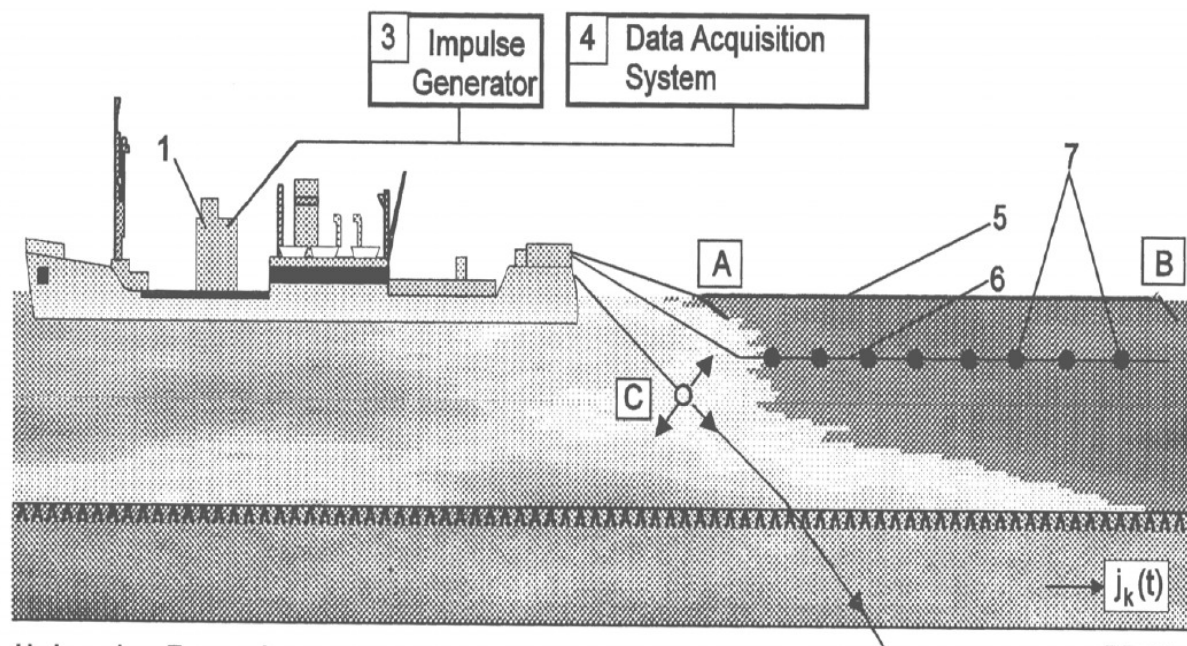


Рис. 6.

На рис. 6 представлена блок-схема морского варианта технологии ТПП-11 для работы в движении судна. Здесь: 1 – судно, С- акустический источник, А,В питающие электроды, 7 - сенсоры сигналов, 5 – кабель питающей линии, 6 – кабель приемной линии, 4 – приемное устройство, 3 – импульсный генератор.

Приведенная система работает так:

Судно движется со скоростью 4-5 узлов по прямолинейному профилю. Зондирования производятся через 10-15 сек. Приемное устройство обрабатывает сигналы с сенсоров и производит построение разреза изохрон регистрируемой интенсивности бинарного сигнала в реальном времени движения судна.

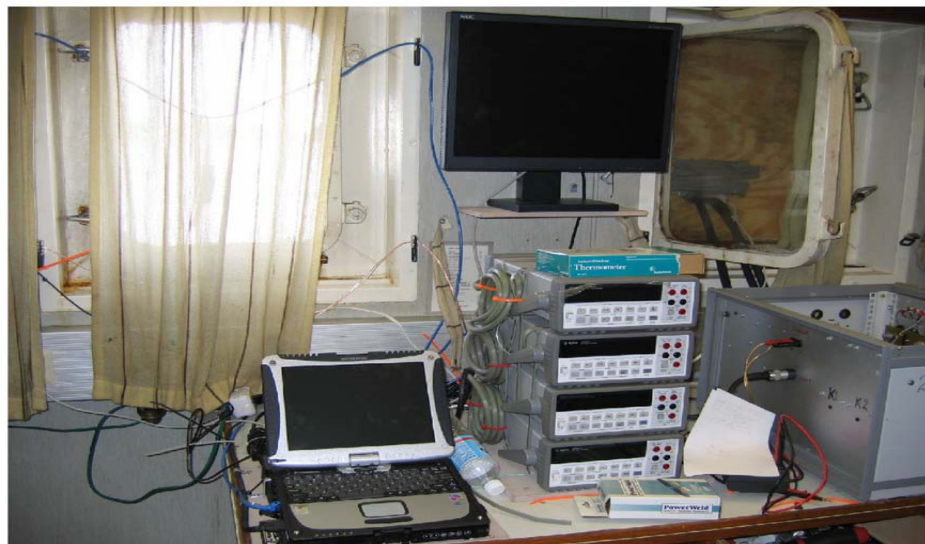


Рис. 7



Рис. 8

На рис. 7 и 8 показан общий вид аппаратуры и палубного оборудования в процессе размотки кабеля с лебедки (Мексиканский залив).

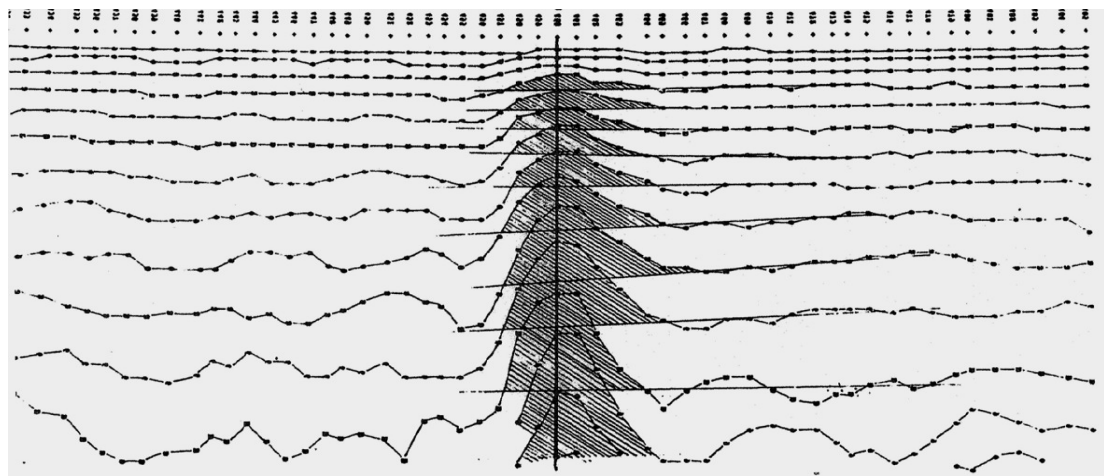


Рис. 9

Регистрируемая информация может быть представлена в трех видах: разреза изохрон, бинарного сигнала на каждом пикете и 2D (3D) разреза по программе яркого пятна. Ниже будут даны примеры каждого вида обработки информации. Характерный пример разреза изохрон приведен на рис. 9. Здесь верхний ряд цифр - номера пикетов измерения, ниже ряд +++ - линия отсчета значений интенсивности сигналов, ниже горизонтальные кривые - характеризующие распределение интенсивности бинарного сигнала на разных временах регистрации после окончания первичного воздействия акустического и электромагнитного импульсов. На каждом пикете регистрация начинается с 20 мс производится через 20 мс до 3,5 сек мс и изображается в виде точек располагаемых вертикально вниз. Эти точки для одного времени регистрации и представляют горизонтальные кривые интенсивности бинарного эффекта вдоль профиля наблюдения. Их мы называем изохронами. Для наглядности на рис. 10 показаны изохроны через 0,16 с. Верхняя кривая соответствует изохроне со временем 0,64 с, нижняя - 2,4 с.

Приведенный разрез изохрон записан в реальном масштабе времени движения судна со скоростью 4 узла вблизи продуктивной скважины №4 месторождения Голицына. Положение скважины показано в виде черной вертикальной прямой. Отсюда видно, что максимум интенсивности бинарного отклика совпадает с положением скважины. Края аномалии совпадают с положением водо-газового контакта нижней залежи. Другие виды обработки приведены ниже.

При поисково-разведочных работах сеть съемки выбирается исходя из поставленных задач:

10 кмх10 км и 5 кмх 5 км - при поисках крупных месторождений,

3 км х 3 км и 1 км х 1 км - при поисках средних и мелких месторождений и оконтуривании крупных,

500 м х 500 м ; 300 м х 300 м и 100м х100 м - при детальном оконтуривании месторождений всех размеров.

После обнаружения залежи и его оконтуривания производят серию зондирований на стопе судна с целью определения глубины залежей и количества продуктивных коллекторов. Рекомендации для заложения скважин глубокого бурения или отказа от бурения на основании данных других методов поиска даются как на основании данных профилирования так и зондирования.

Общий объем испытаний технологии составил 3310 пог.км профилей. Из них 250 км на Баренцевом море в спорном с Норвегией секторе ; 2200 км в

Украинском секторе Черного моря ; 170 км в Болгарском секторе Черного моря ; 250 км в Печорском море у побережья о.Колгуев ; 200 км в Печорском море на Мурманской структуре , 240 км в Мексиканском заливе. По результатам указанных съемок было дано 23 рекомендации, подтверждены бурением 21 , ошибочных прогнозов два - так была пропущена маломощная Южно-Голицынская залежь, разработка которой оказалась не рентабельной.

4. Характерные примеры результатов поисково-разведочных работ по технологии СПСО.

Обычно результаты поисково-разведочных работ являются собственностью заказчика и не разглашаются. Однако некоторые результаты могут быть сообщены без привязки данных к координатам.

4.1. Обнаружение и оконтуривание залежей. Результаты бурения.

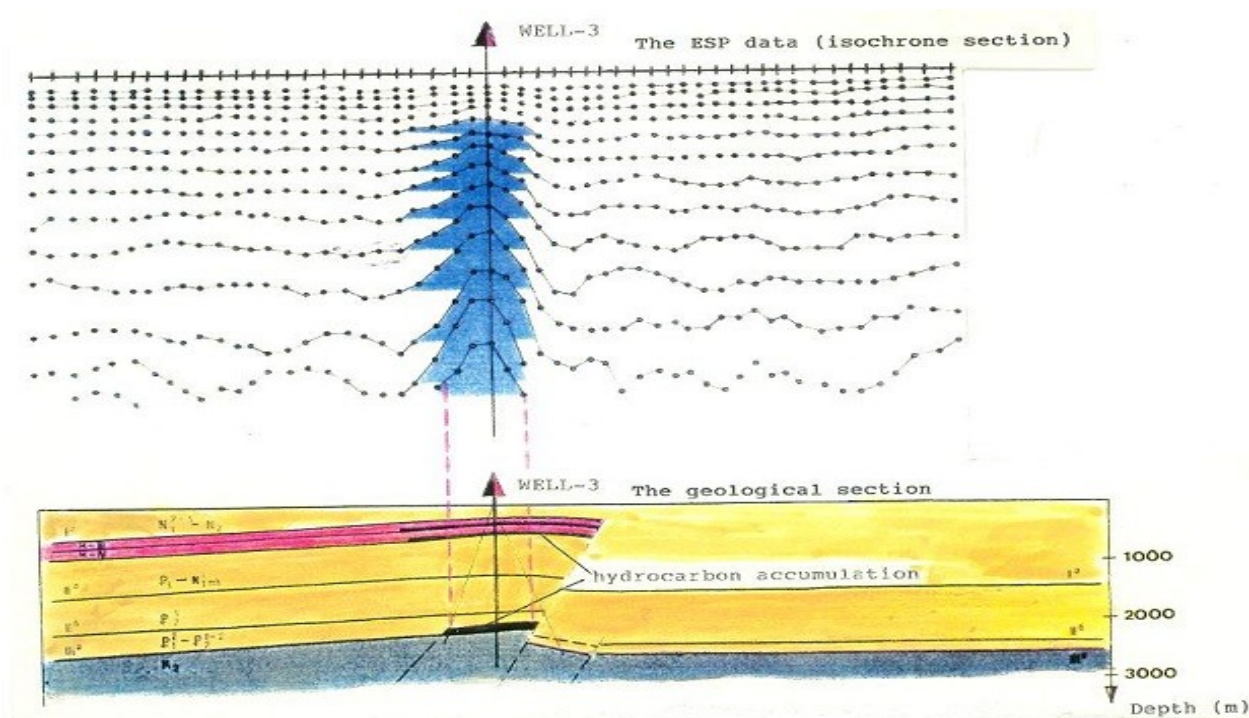


Рис.10

4.1.1. Обнаружение залежей.

Промышленная залежь УВ обнаруживается по резкому возрастанию интенсивности бинарного поля уже при первом ее пересечении в реальном времени движения судна. Для иллюстрации на разрезе изохрон (Рис.10), совмещенном с геолого-геофизическим разрезом, показана аномалия над антиклинальной ловушкой месторождения Голицына, четко фиксирующая положение залежи. Для сравнения можно посмотреть разрез изохрон, полученный над пустой ловушкой - структурой Сельского (рис. 15). Сравнение рис.10 и рис.15 показывает существенные отличия в характере поведения изохрон при наличии залежи. Для повышения надежности результата производят 2-3 дополнительных пересечения по параллельным

профилям справа и слева от профиля первого обнаружения. Расстояния между профилями выбирается от 200 до 400м. Если аномалии по всем профилям хорошо коррелируются, дается рекомендация на детальное изучение контура залежи, определения количества горизонтов и их глубин залегания. Наиболее весомым открытием технологии СПСО является обнаружения залежи на северном крыле структуры Штормовое, являющееся сейчас самым крупным действующим месторождением Украины на Черном море. Более подробно об этом открытии этого месторождения сказано ниже в разделе 4.1.3.

4.1.2. Тестовое оконтуривание известных залежей.

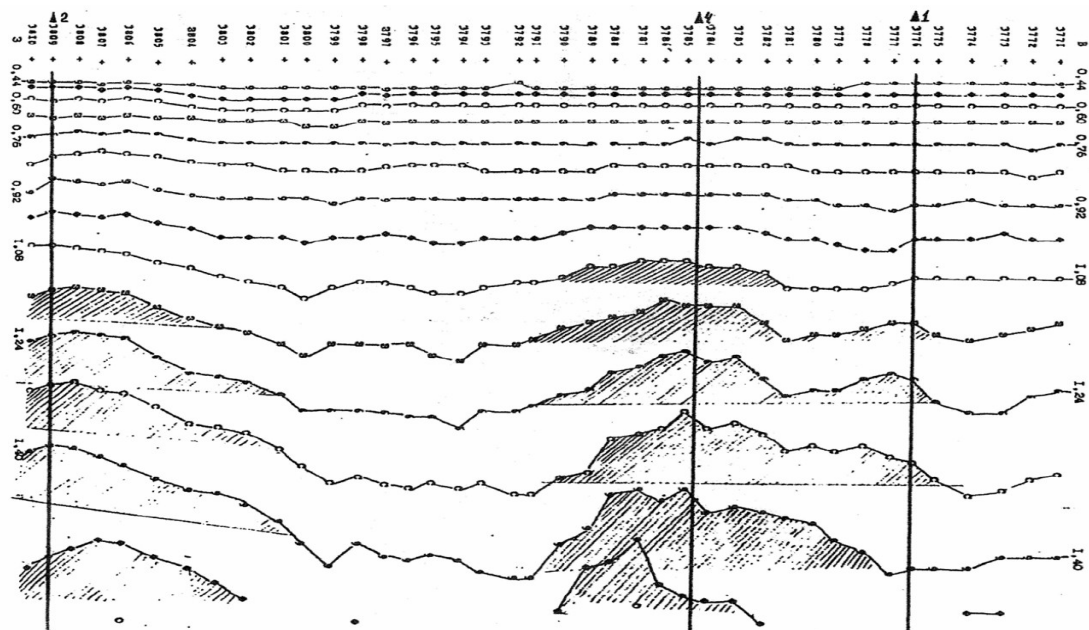


Рис. 11

Для тестового опробования данной технологии было выбрано месторождение Голицына в украинском секторе Черного моря.

На месторождении пробурено три скважины №№ 1,4 и 2 вдоль широтного профиля (рис. 11). Первая (восточная) скважина оказалась практически пустой, вторая и четвертая - продуктивные. Газоконденсатные залежи выявлены на глубинах 550 и 2 200 м в майкопских и датских отложениях

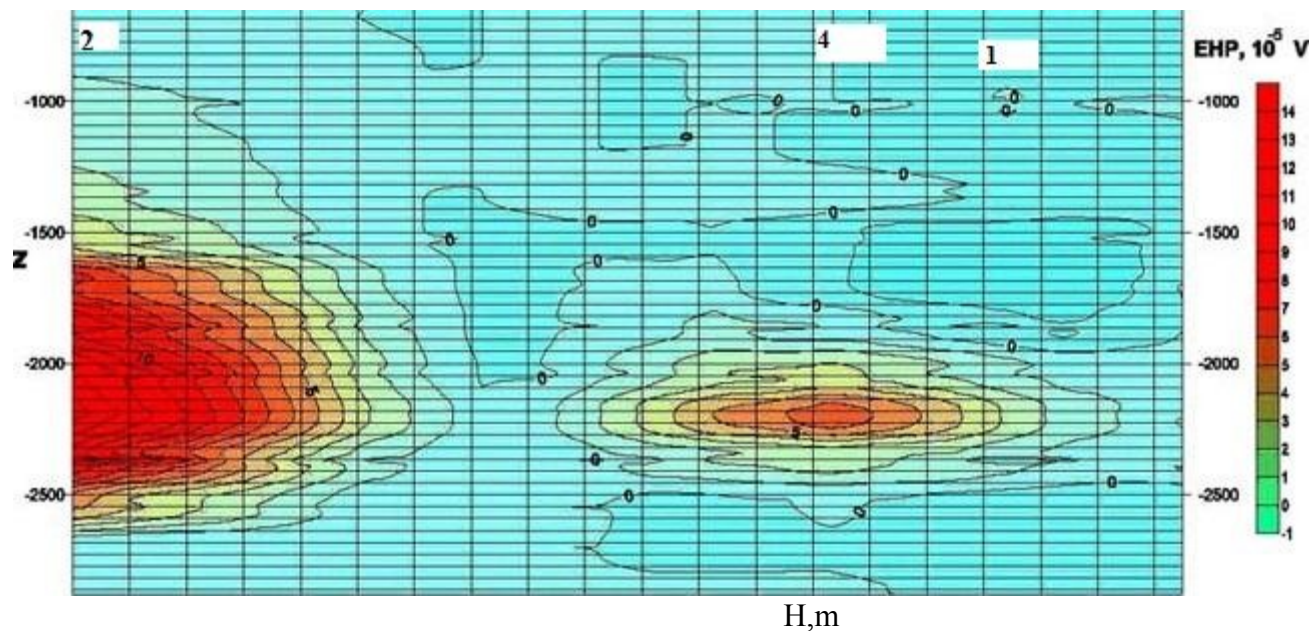


Рис. 12

соответственно. Верхняя залежь находится в песчаном коллекторе с суммарной мощностью около 12 метров, с пористостью 15-20% и проницаемостью до 250 мД. Нижняя - в известняках с пористостью 12-18% и проницаемостью до 200 мД. Мощность нижней залежи - около 60 м. извлекаемые запасы месторождения - более 10 млрд. куб. м газа и 0, 33 млн. т конденсата. Месторождение находится в эксплуатации. Контуры залежей по данным бурения и сейсмоки охватывали обе продуктивные скважины. Однако, широтный профиль по технологии МСЛ, пройденный рядом со скважинами 1, 4 и 2 (Рис. 11) показал, что контур месторождения распадается на две части: западную и восточную. Это же подтверждает и обработка приведенного профиля рис. 11 по программе яркого пятна (рис. 12) На каждой из этих частей было отработано по 18 меридиональных профилей МСЛ через 250 м. Построенные по этим данным контуры залежей [2] впоследствии подтвердились наклонным бурением со стационарных оснований скважин 4 и 2.

4.1.3. Обнаружение продуктивных ловушек и оконтуривание новых залежей.

Характерным примером обнаружения и оконтуривания ранее неизвестных залежей является площадная съемка по сети 2км x 2км охватывающая структуры Сельского и Штормовое. Обе структуры была выявлена сейсморазведкой по отложениям верхнего мела. Приведенный на Рис.13 разрез изохрон зафиксировал характерную для продуктивных залежей аномалию на северном крыле структуры Штормовое.

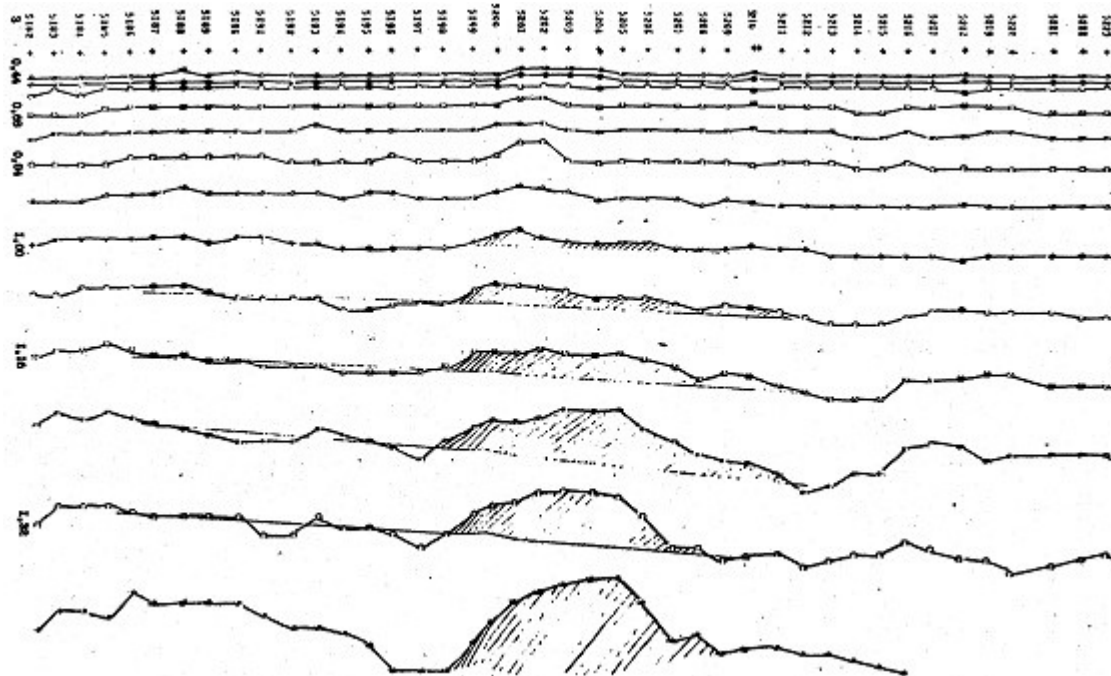


Рис. 13.

Серия профилей, выполненная затем вблизи приведенного на рис.13 профиля позволила построить контур залежи, приведенный на рис.14. Поисковое бурение проводилось после работ СПСО по широтному профилю, основываясь на сейсмических данных. Первая восточная скважина выявила водоносный коллектор с высокой проницаемостью, вторая (центральная) - получила из выявленного коллектора непромышленный приток газа и только третья скважина, пробуренная в контуре СПСО дала промышленный газ с глубины около 2000 м. Позднее бурение подтвердило контур залежи СПСО. Очевидно, что более эффективно было бы разбуривать залежь внутри контура СПСО сразу.



Рис.14

4.1.4 Обнаружение новых продуктивных горизонтов на известных месторождениях.

Месторождение Шмидта. До работ по технологии СПСО на месторождении была известна одна майкопская залежь на глубине 650 м. Залежь была оконтурена площадной съемкой. Однако, зарегистрированные сигналы СПСО позволили сделать вывод, что кроме известной майкопской залежи на глубине 650 м, имеется более глубокая меловая залежь на глубине около 2 800 м [2]. Наклонное бурение в сторону контура СПСО подтвердило наличие этой залежи, что значительно увеличило запасы месторождения.

4.2. Рекомендации по отказу от бурения при отсутствии достаточной интенсивности откликов от УВ.

Юго-западнее месторождения Штормовое находится антиклинальная структура Сельского (рис. 14), считавшаяся перспективной на получение промышленных притоков УВ.

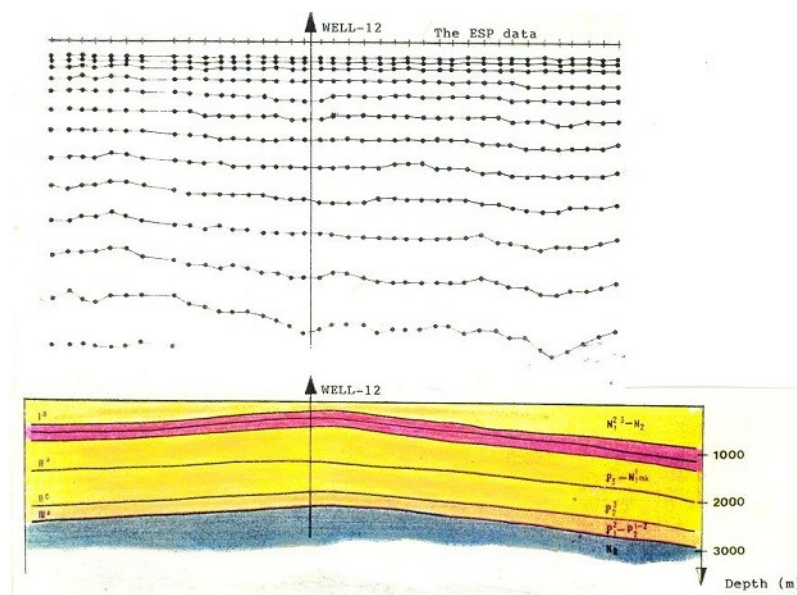


Рис. 15

Съемка по технологии СПСО показала, что структура не содержит промышленных запасов УВ. Была дана рекомендация на отказ от бурения, однако в сводовой части структуры были пробурены две пустых скважины. На рис. 15 показан разрез изохрон вблизи одной из упомянутых скважин, совмещенный с геолого-геофизическим разрезом. На приведенном разрезе изохрон СПСО нет никаких признаков присутствия УВ в структуре.

4.3. Изучение глубинных залежей (около 5 км) в корбонатном рифе.

Для изучения эффективности технологии СПСО было предложено выполнение ряда профилей на уже разбуренной акватории в Мексиканском заливе. Никаких геолого-геофизических данных Заказчик не сообщил. В процессе съемки на одном из профилей были записаны слабые сигналы СПСО соответствующие глубинам более 4 км. На рис.16 показан пример записи сигналов СПСО как функции времени вдоль профиля наблюдения. Ось времен направлена вниз, амплитуд - влево. Регистпация велась в течение 3 секунд после окончания генераторного импульса. Каждая ступенька на записанных сигналах СПСО соответствует одному микровольту. При сопоставлении данных технологии СПСО и бурения оказалось, что положение центра выявленных сигналов совпадает с положением продуктивной скважины,

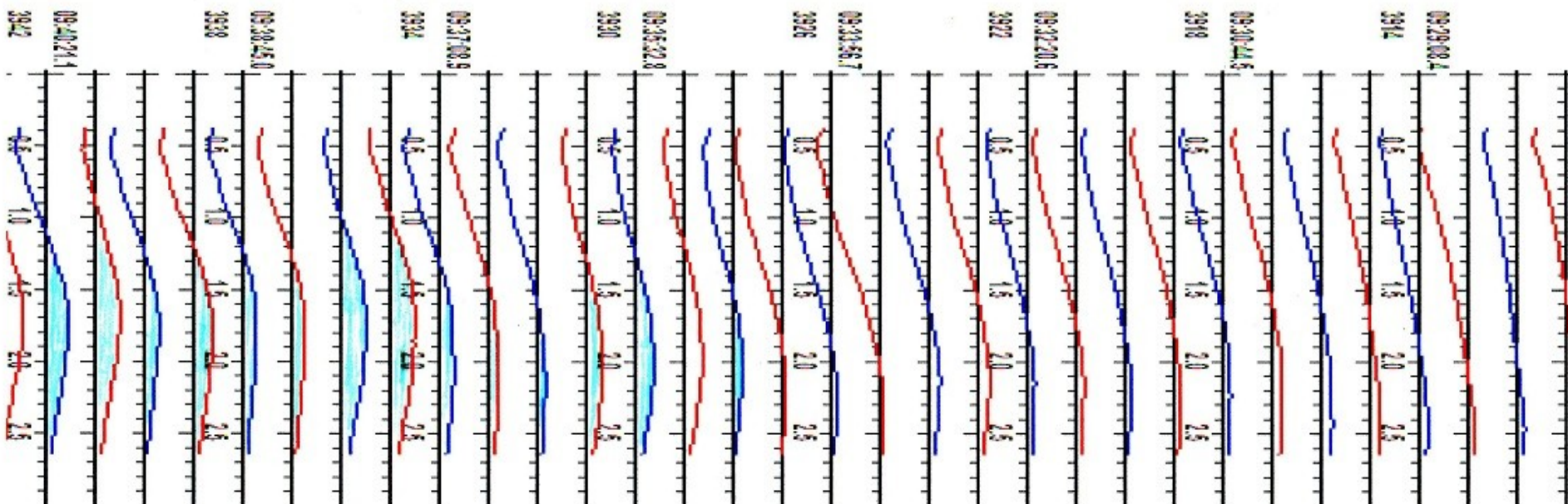


Рис. 16

вскрывшей продуктивную залежь газа в погребенном рифе на глубине 14800 футов (около 5 км). Обработка по программе яркого пятна дала результаты, приведенные на рис. 17. Как видно из рисунка, положение продуктивной скважины совпадает с центром наиболее “яркого пятна”. На том же профиле при прохождении мимо двух пустых скважин, положение которых не было дано заранее, никаких данных о наличии УВ не было получено.

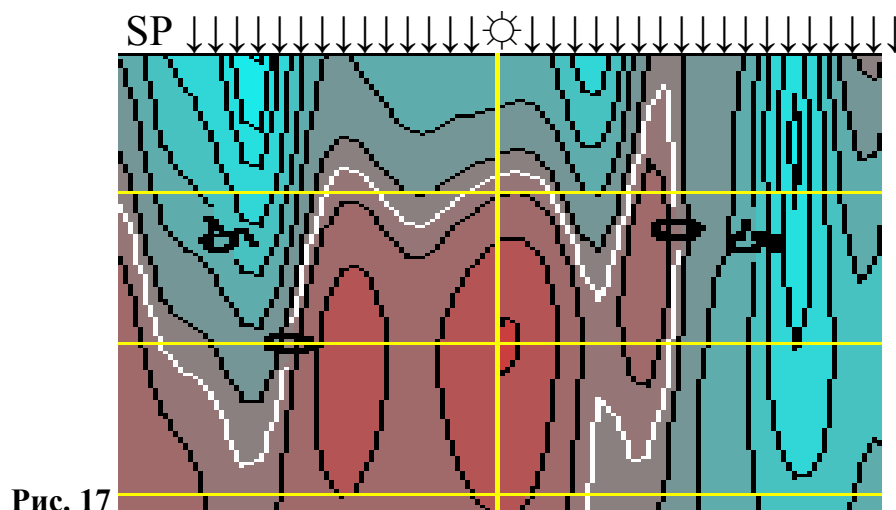


Рис. 17

4.4. Изучение морского продолжения прибрежной залежи.

Прибрежное месторождение Приозерское на восточном берегу о. Колгуев не было изучено бурением в морской части. Выполненная съемка в Печорском море вдоль побережья острова показала, что данное месторождение простирается в море примерно на 1 км от берега [2]. Позднее эти данные были подтверждены бурением.

4.5. Изучение присолевых и подсолевых месторождений.

В спорном с Норвегией секторе Баренцева моря был отработан профиль совпадающий с сейсмическим профилем, выполненным ранее. Сейсмический профиль выявил соляной купол, выходящий практически под дно моря. Данные технологии СПСО показали, что вблизи купола предположительно имеются залежи УВ примыкающие к куполу и частью уходящие под него. По известным причинам работы были прекращены. После разрешения пограничного спора с Норвегией возможно продолжение этих исследований с целью открытия нового месторождения УВ.

5. Основные технические характеристики морской технологии метода СПСО.

Технология СПСО имеет следующие основные характеристики:

1. Назначение

1.1. Технология СПСО использует бинарный сейсмо-электромагнитный эффект, возникающий в промышленных коллекторах углеводородов (УВ), описанный А.Э. Бергом в патенте США № 7,330,790 с приоритетом от 5 октября 2005 г. [1] (патент распространяется только на территорию США)

1.2. Технология СПСО предназначена для обнаружения промышленных залежей УВ в ловушках любого типа, определения их контуров и глубины залегания. По данным съемки с технологией СПСО даются рекомендации по заложению скважин глубокого бурения или отказу от бурения в точках рекомендованных по данным других геолого-геофизических методов и неподтвержденных СПСО.

2. Погрешности

2.1. Погрешность определения положения контуров залежей не более +/- 150 м. Находится путем повторного прохождения профиля.

2.2. Погрешность определения глубины залегания залежи не более +/-200 м $\times (1+N/2)$ для малоизученных акваторий и +/-50 м $(1+N/2)$ для изученных хорошо. Вычисляется по трем близко расположенным зондированиям.

2.3. Рекомендации по заложению скважин подтверждаются с вероятностью не менее 75%, т.е. из 4 рекомендованных скважин по данным СПСО допускается одна пустая. Иными словами, технология СПСО обеспечивает коэффициент успешности бурения (Exploration Success Rates) не менее 75%. (В настоящее время коэффициент успешности бурения около 25%)

2.4. Рекомендации по отказу от бурения подтверждаются с вероятностью 85%, т.е. допускается одна ошибка на 6 отказов.

Не считается ошибкой технологии, если на изученной с технологией СПСО акватории в побуренной по данным других методов скважине обнаружат УВ не дающие стабильных промышленных притоков или залежи нерентабельны для разработки вследствие малых запасов.

3. Глубина моря, соленость, навигация и потребляемая мощность.

3.1. Технология предназначена для работы на акваториях с глубиной от 5 до 300 м и соленостью выше 10 промилле. Однако, она может быть модифицирована для работ на глубинах до 2000 м или при солености выше 1,0 промилле. Другой вариант модернизации позволит использование СПСО на суше.

3.2. Навигационное обеспечение технологи осуществляется системами GPS или ГЛОНАСС. Погрешность определения места судна не более +/- 20 м.

3.3. Потребляемая мощность от борт-сети судна не более 50 кВт.

4. Производительность.

4.1. Производительность работ на прямолинейных профилях не менее 7 км/час.

4.2. Производительность при зондированиях на стопе судна не менее 5-ти в сутки.

6. Заключение

Рассмотренная выше морская технология прямых поисков нефти и газа есть первый шаг в практическом использовании бинарного сейсмо-электрического эффекта [1]. Классическая геофизика не встречалась с этим эффектом. Поэтому технология СПСО открывает новую страницу в истории геофизики. Очевидно, что новый эффект может быть использован и на суше - автор испытывал сухопутный вариант технологии в штате Невада. В настоящее время технология СПСО готова для внедрения в поисково-разведочный процесс.

Литература

1. A. Berg. Method of Seismo-Electromagnetic Detecting of Hydrocarbon Deposit, US Patent № 7,330,790. October 2005.
2. А.Э. Вишняков (Берг) и др. Отчеты по НИР и хоздоговорным работам. Фонды НИИГА (Севморгео).
3. A.H. Thompson, G.A. Gist. Geophysical application of electrokinetic conversion. The Leading Edge, №12, 1993
4. M.A. Biot. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. J. Acoust. Soc.Am. 28, 1956
5. Ю.В. Якубовский, Л.Л. Ляхов. Электроразведка."Недра", 1964 г.
6. И.Е. Тамм. Основы теории электричества. Гостоптехиздат, 1954
7. С.А. Назарный, В.А. Комаров. Вызванная сейсмоэлектрическая поляризация. Изд. СПб Университета, 2001г.

