

## Несейсмические методы

### Метод естественного поля для задач поиска углеводородов в открытом море дает потенциальное снижение себестоимости. Natural source EM for offshore hydrocarbon detection offers potential cost savings

Leo Fox и Olex Ingerov of Phoenix Geophysics\* предлагают использовать морские магнитотеллурические измерения как экономически эффективную альтернативу морским электромагнитным методам с активными источниками

С 2000 года основные нефтегазоносные компании все в большей степени использовали морские электромагнитные методы исследования с активными источниками (MCSEM) для определения параметров проводимости глубоководных морских геологических структур, уже открытых морскими сейсмическими методами. Нефтегазоносные компании высказали пожелание избежать высокой стоимости (~\$50 миллионов) морских непромышленных скважин. Метод MCSEM доказал свою высокую эффективность.

В этой статье предлагается новая концепция морских магнитотеллурических исследований (MMT) – Fox and Ingerov (2006), рис. 1, – позволяющая получить информацию, аналогичную MCSEM, но при уменьшенной стоимости. Концепция, основанная на прецизионных измерениях вертикальной компоненты магнитного поля (Hz), получила название метода естественного поля (NSEM).

#### Морские методы измерения с активными источниками и магнитотеллурические измерения

Методики морских измерений электромагнитных полей с активными источниками (MCSEM) и магнитотеллурические измерения (MMT) были разработаны в основном усилиями океанографов в процессе глубинных океанических исследований (Chave et al., 1991). В начале 90-х годов консорциум MMT, управляемый Институтом Океанографии Scripps, Университет Калифорнии, адаптировал глубинный океанический метод MMT для поисков и разведки углеводородов, первоначально для решения проблем, связанных с соляной тектоникой в Мексиканском заливе. ExxonMobil в независимом исследовании разработал аналогичные методики R3M (Srlnka, 2001).

В этой работе, MCSEM используется как общий термин, для обозначения способов исследований, при которых электрический дипольный источник располагается над дном океана, а набор неподвижных двухосных приёмников электрического поля располагается на дне океана перпендикулярно исследуемой структуре. Движущийся диполь излучает электромагнитные волны с шагом по частоте 0.5 Hz, отклик от которых регистрируется приёмниками. В R3M также используется активный источник, но в остальном эта методика существенно отличается от MCSEM.

После 1990 г.г. научные сотрудники Statoil начали испытание MCSEM для определения проводимости разведанных сейсмическими методами морских структур. В 2002 г. после успешных испытаний Компания предоставила для использования технологию придонной записи (SBL) – рис. 2 – для новой сервисной компании Электромагнитная Геослужба (EMGS). Сервисы, основанные на MCSEM, предоставляются также компанией Offshore Hydrocarbon Mapping (OHM). Со временем успешных тестирований SBL, проведенных компанией Statoil, многие нефтегазовые компании стали все в большем объеме применять MCSEM метод для определения проводимости глубинных (~1000 м)

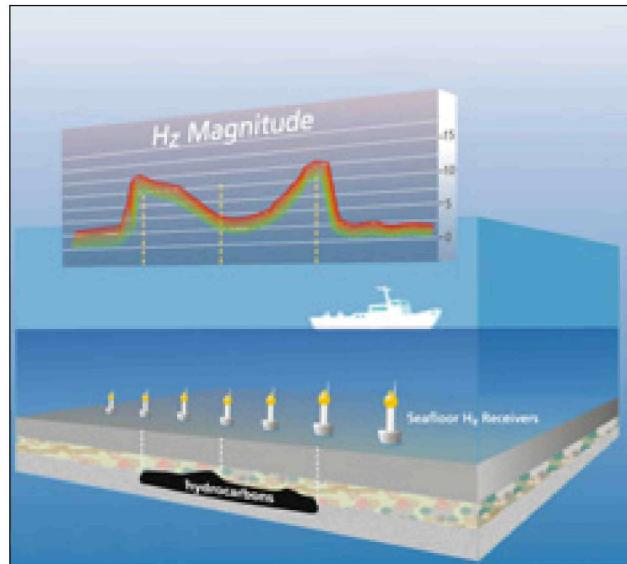


Рис. 1 Схема, иллюстрирующая развертывание группы  $H_2$  датчиков над морским месторождением углеводородов, и кривые, характеризующие соответствующую изменчивость магнитуды  $H_2$ .

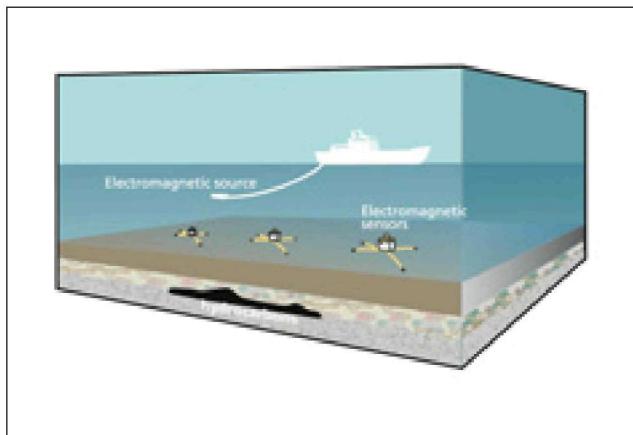
морских структур, выявленных сейсмическими исследованиями (возможных углеводородных ловушек). Методики MCSEM вполне успешно прошли испытания, и рынок сервисных услуг, основанных на этих методиках, быстро расширяется (McBarnet, 2007).

MMT использовался, главным образом, как дополнение к MCSEM для получения данных о базовой проводимости придонных осадков, а именно для получения ограничений при решении обратных задач в MCSEM (получения зависимостей проводимости от глубины). Причиной разработки MCSEM была уверенность, что MMT не может применяться аналогично MCSEM, как будет объяснено далее.

Насыщенные углеводородами морские отложения имеют удельное электрическое сопротивление значительно более высокое (приблизительно 100-250 ом/м), чем обычные геологические разрезы «чистых» (свободных от углеводородов) морских осадков (1-3 ом/м). На рис. 3 изображён профиль MCSEM над нефтяным и газовым месторождением Troll в Северном море. На рис. 4 изображены нормализованные амплитуды MCSEM в зависимости от выноса (MVO) для этого же профиля. Чтобы освободиться от влияния структуры, аномалия нормализована относительно фоновой аномалии по отношению измерений над структурой к одновременно измеренным значениям на дне. Аномалия на рис. 4 изменяется от 0.05 (5%) до 4.0 (300%). Поскольку месторождение Troll является обширным, эти значения являются наиболее вероятными предполагаемыми значениями.

\* Phoenix Geophysics Ltd., Toronto, Ontario, Canada, [www.phoenix-geophysics.com](http://www.phoenix-geophysics.com)

## Несейсмические методы



**Рис. 2** Технология донной записи EMGS – Farrelly et al., 2004.

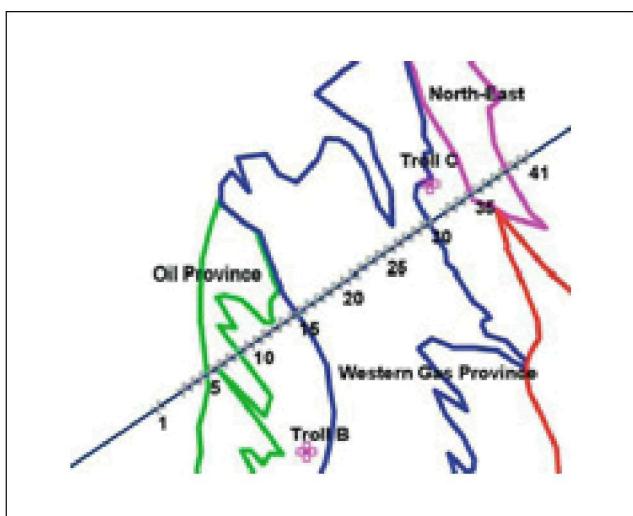


Рис. 3 Схема съемки месторождения *Troll SBL* —  
Farrelly et al., 2004.

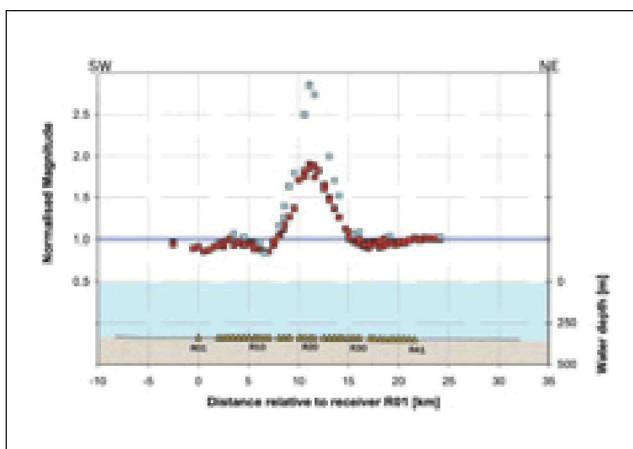


Рис. 4 Средние нормализованные магнитуды при значении выноса  $5 \text{ км} \pm 0.25 \text{ км}$ . Красные квадратики представляют электрические измерения; светло-голубые квадратики – магнитные измерения; кружочки – положение приемников (Farrelly et al. 2004).

## MCSEM в сравнении с MMT

ММТ обычно измеряет только горизонтальные компоненты электрического поля (именуемые  $E_x$  и  $E_y$ ) и горизонтальные компоненты магнитного поля (именуемые  $H_x$  и  $H_y$ ). Источник ММТ является сигналом природного происхождения, возникающим в результате изменчивости магнитного поля Земли (Chave et al., 1991; Vozoff, K., 1991). ММТ сигнал является вертикально падающей плоской волной, однородной на относительно больших расстояниях по горизонтали. Вертикально падающая плоская волна ММТ вызывает горизонтальные токи в придонных осадках. Эти токи легко проходят над и под типичным морским углеводородным скоплением («целевая структура»), которое может быть охарактеризовано как субгоризонтальная тонкая призма пород малой проводимости, заключенная в намного более проводящих окружающих породах. Таким образом, подобная структура мало влияет на горизонтальные компоненты электрических ( $E_x$ ,  $E_y$ ) и магнитных ( $H_x$ ,  $H_y$ ) полей. Другими словами, четырех компонентный сигнал ММТ является слабо связанным (слабо интенсивным) с подобными структурами. В отличие от ММТ, метод MCSEM использует искусственный (или активный) источник. Приемники MCSEM также измеряют две горизонтальные компоненты электрического поля, но благодаря существенно различным характеристикам естественного и искусственного источников поля, поля, генерированные MCSEM источником, хорошо согласуются с объектом, и горизонтальные электрические поля, регистрируемые приемниками MCSEM, чувствительны к искомому объекту.

ММТ ТЕ/ТМ удельное сопротивление и фаза (не показана), вычисленные по модели рис. 5 (которая использует данные по Farrell et al., 2004 для упрощения сопоставления), имеют аномальное удельное сопротивление  $\sim 15\%$  и аномальную фазу  $\sim 4^\circ$ , что в целом даёт величину аномалии  $\sim 10\%$ . Таким образом, самые большие аномалии ММТ (использующие четырех компонентный морской метод МТ) являются реально сопоставимыми с самыми маленькими аномалиями MCSEM. Подведем итоги выше приведенного рассмотрения. Широко распространено мнение, что только метод MCSEM может надежно определить проводимость морских сейсмических структур, так как горизонтальные компоненты электрического и магнитного полей ММТ гораздо менее чувствительны по сравнению с MCSEM к наличию относительно тонких почти горизонтальных слоёв с повышенным сопротивлением (таких, как содержащие углеводороды отложения). В любом случае считается, что аномалии, обусловленные природными полями, слишком слабы для надёжной регистрации. Поэтому направление развития метода морских ЕМ с 1998 г. было ориентировано на методы с активным источником, а не ММТ.

## Высокоточные измерения Hz в ММТ

В отличие от горизонтальных полей ( $E_x$ ,  $E_y$ ;  $H_x$ ,  $H_y$ ), вертикальные компоненты электрического поля  $E_z$  и магнитного поля  $H_z$  (также называемые «рабочими» («tipper»)) ММТ обладают высокой чувствительностью к латеральным границам проводимости,

## Несейсмические методы

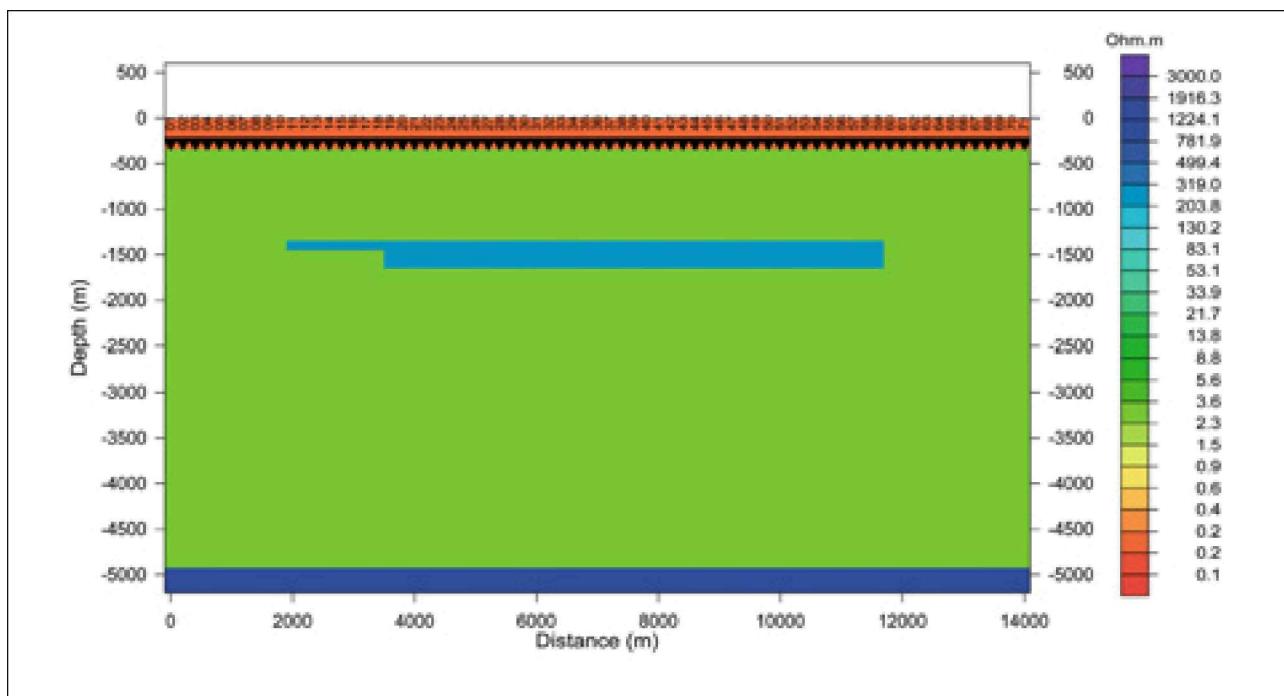


Рис. 5 2D разрез через месторождение Troll, использованный для 2D ММТ опережающего моделирования. ММТ станции представлены небольшими черными кружочками (номера 2-66) на дне моря на глубине ~340 м. Углеводородо-насыщенный пласт (200 ом/м) имеет мощность 100 м (слева), в любом другом месте 300 м, образуя в сечении прямоугольную горизонтальную призму шириной 9.8 км. Вмещающие породы имеют удельное сопротивление 2 ом/м. Морская вода имеет удельное сопротивление 0.3 ом/м. (Farrelly et al., 2004.)

таким как латеральные резистивные границы придонных углеводородных скоплений. Однако, в обоих случаях ожидаемая эффективность слишком мала (приблизительно 1% от величины напряженности горизонтальных полей). Поэтому ММТ обычно не измеряет  $E_z$  или  $H_z$  компоненты, так как надежные результаты получить трудно.

Источником шума при измерении  $E_z$  является ненулевой изменяющийся фон, возникающий из сил  $\nabla \times \mathbf{H}$ , действующих на движущуюся (проводящую) океаническую воду в магнитном поле Земли.

Напротив, магнитуда  $H_z$  теоретически везде должна быть равна нулю, кроме областей, находящихся в непосредственной близости к областям с контрастной проводимостью (рис. 6). Считается, что невозможно надежно определить ожидаемую небольшую магнитуду аномалии  $H_z$  (рис. 6) от объекта, такого как модель месторождения Troll на рис. 5. Можно ли надежно определить ~1% аномалию рис. 6? Как упоминалось выше, магнитуда  $H_z$  теоретически должна быть равна нулю, за исключением случая над границей контрастной проводимости; это благоприятный случай – аномалия представляет возмущения нулевого порядка. В некоторой степени полезным аналогом может быть девятикратное поле обзора невооруженным глазом слабых астрономических объектов, таких как Млечный Путь, по сравнению с темным фоном пространства. Реальный фон для ММТ- $H_z$  измерений является, конечно, ненулевым, а обусловлен шумом в результате эксцентрикитета вертикального датчика, инструментальной ошибки, шума аппаратуры, нескомпенсированных температурных изменений, топографического эффекта, геологического шума и т. д. Применимость методики зависит от эффективности подавления всех источников шума (помех).

Донная топография известна и может быть учтена. MCSEM сталкивается с геологическим шумом, по крайней мере, так же часто, как и ММТ, и, несмотря на это, является эффективным. Можно отметить, что ММТ по существу обладает более широким диапазоном рабочих частот, чем MCSEM (несколько декад против одной декады), и это в принципе может помочь в обнаружении многочисленных имеющих проводимость целевых структур на разных глубинах, поскольку эффекты от них проявлены в различных частотных диапазонах (рис. 9).

Измерительная аппаратура может быть изготовлена с точными деталями и достаточно точно откалибрована. Донная температура очень стабильна. Шум датчика является достаточно слабым, так что для  $H_z$  может быть предложен ряд отношений S/N (относительно шума датчика на дне) приблизительно от 0.5 до 5.0 (зависит от мощности поля, которая переменна). Из практики сухопутных измерений известно, что магнитуды  $H_z$  порядка 0.01 (или менее), несомненно, могут быть надежно и согласованно измерены (рис. 10). Также может быть улучшено отношение S/N суммированием и осреднением; в случае Гауссового распределения

ошибок улучшение составляет  $\sqrt{N}$ , где  $N$ =число суммированных измерений. Например, четырехдневное зондирование заняло  $(4 \times 86,400 \text{ сек}) = 345,600 \text{ сек}$ . Это, по крайней мере, 100 сумм на каждый 1000-секундный период измерения, и, если шум имеет распределение Гаусса, результативное улучшение отношения S/N будет  $\sqrt{100} = 10$ . Удаленный источник опорного напряжения и другие способы обработки могут обеспечить дополнительное улучшение. Другими словами,

## Несейсмические методы

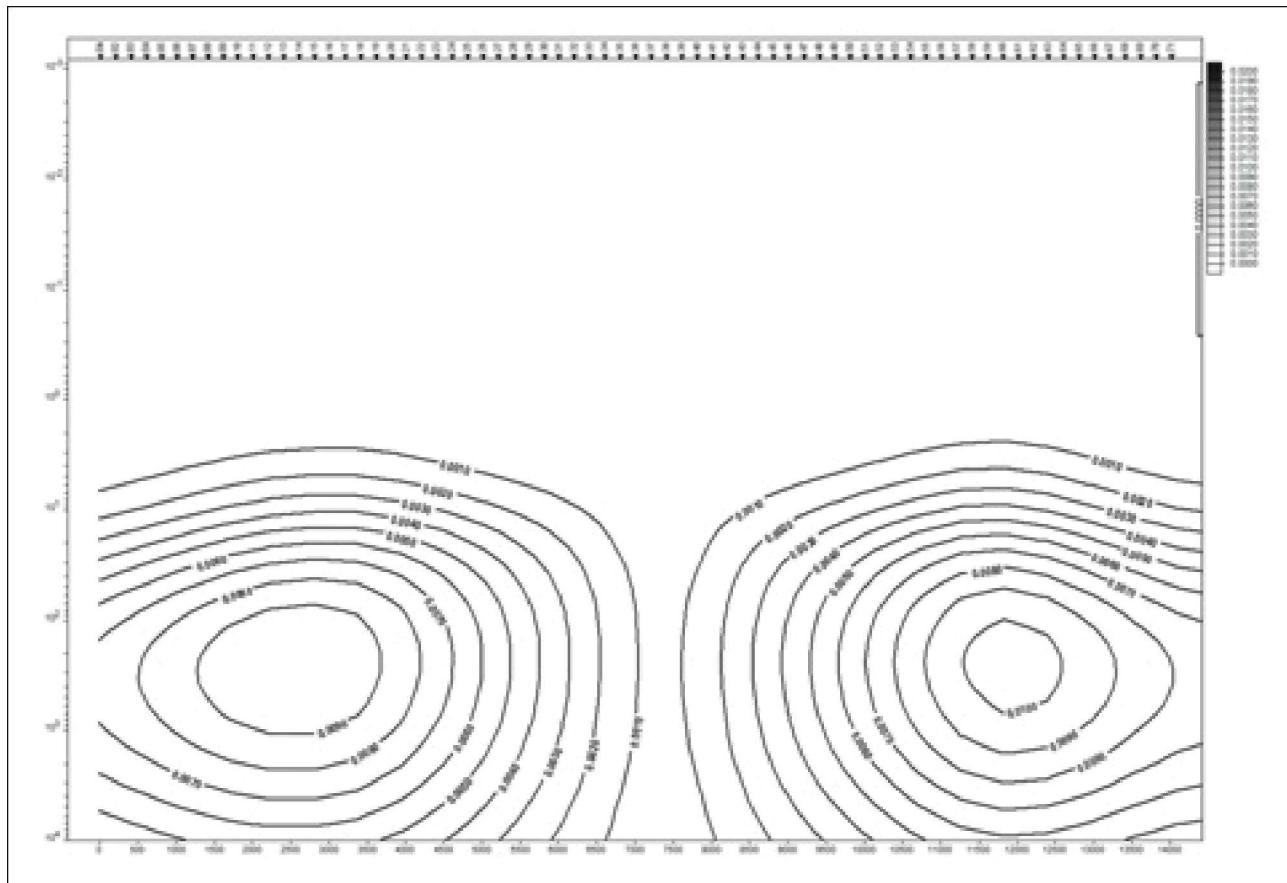


Рис. 6 Магнитуда  $H_z$  (макс. ~1%), вычисленная по модели рис. 5, отображающая типичный максимум непосредственно над экстремальными значениями границы, центральный минимум и нулевой фон вмещающих пород.

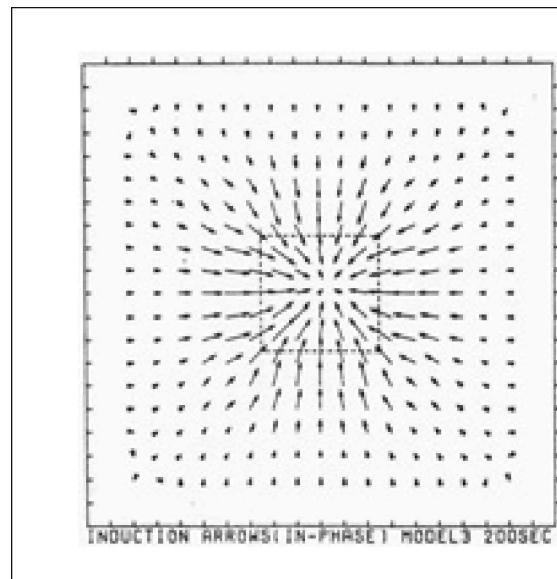


Рис. 7 В этом схематическом представлении действительная часть IV направлена в сторону равен или более, чем ожидаемая аномалия, и представлен в отрицательной аномалии (Lam *et al.* 1982). Стрелки широком диапазоне. Более того, так как знак ошибки всегда показывают направление от положительной аномалии удельного сопротивления, такой как углеводородо-насыщенная структура.

рассматриваемые сигналы Hz, хотя и малы, достаточно проявлены по величине, чтобы их можно было измерить существующими магнитными приборами, хотя измерения требуют тщательного конструирования приборов и достаточного времени измерения и т.д.

Ошибки настройки, пожалуй, является самой важной, так как небольшая ошибка настройки вертикального (Hz) датчика вызывает Hz с магнитудой, читаемой аналогично аномальному признаку. Это возникает из-за того, что нецентрированный (не вертикальный) датчик Hz является (из элементарных тригонометрических расчётов) горизонтальной проекцией, пропорциональной синусу угла ошибки, и, таким образом, будет чувствительным к небольшим долям горизонтального поля Hx и Hy. Например, синус (0.1 град) равен ~0.002. Эта величина не кажется значительной. Однако, магнитуда горизонтальных компонент обычно в 50 раз больше ожидаемой магнитуды аномального вертикального поля Hz, искомого в этой задаче.

Другими словами, шум от ошибки центрирования может быть равен или более, чем ожидаемая аномалия, и представлен в положительный (систематическая ошибка одного знака), она не может быть исключена путем простого суммирования, которое уменьшает ошибку алгебраическим взаимным уничтожением.

## Несейсмические методы

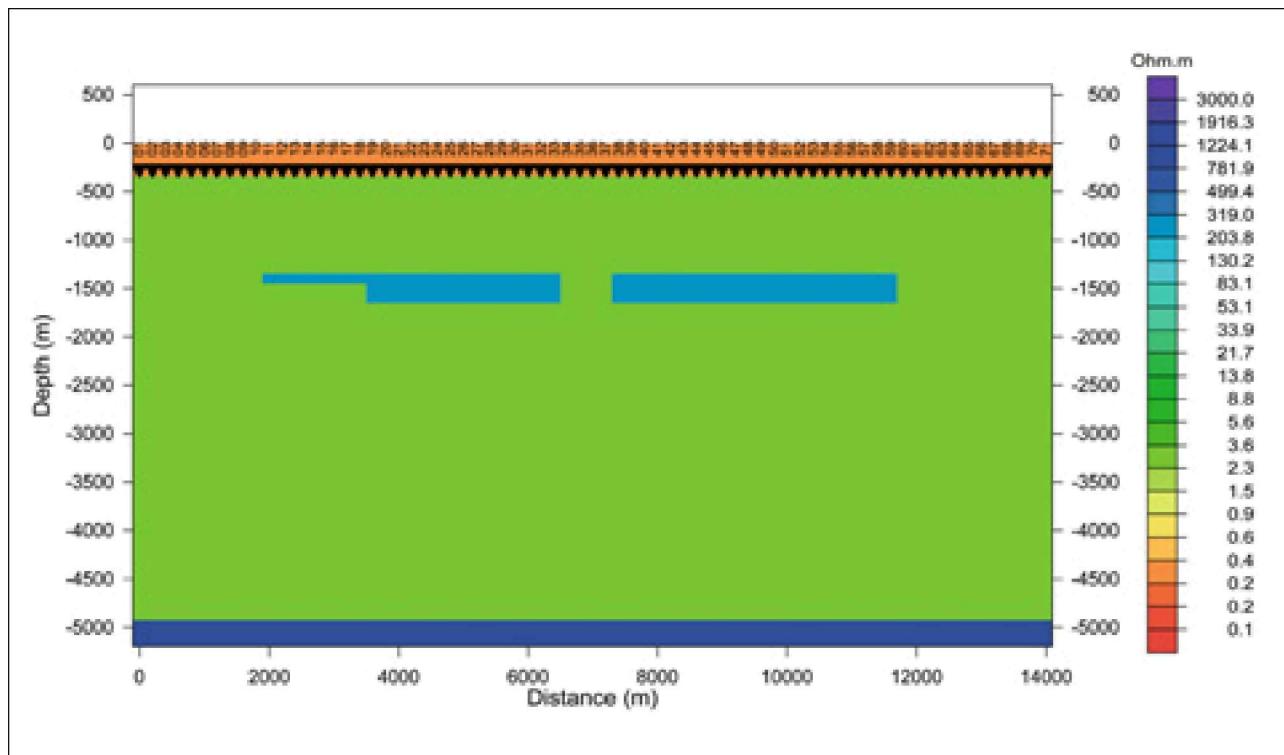


Рис. 8.1 Видоизмененная модель месторождения Troll, иллюстрирующая эффект внутреннего затопления центральной 800-метровой зоны.

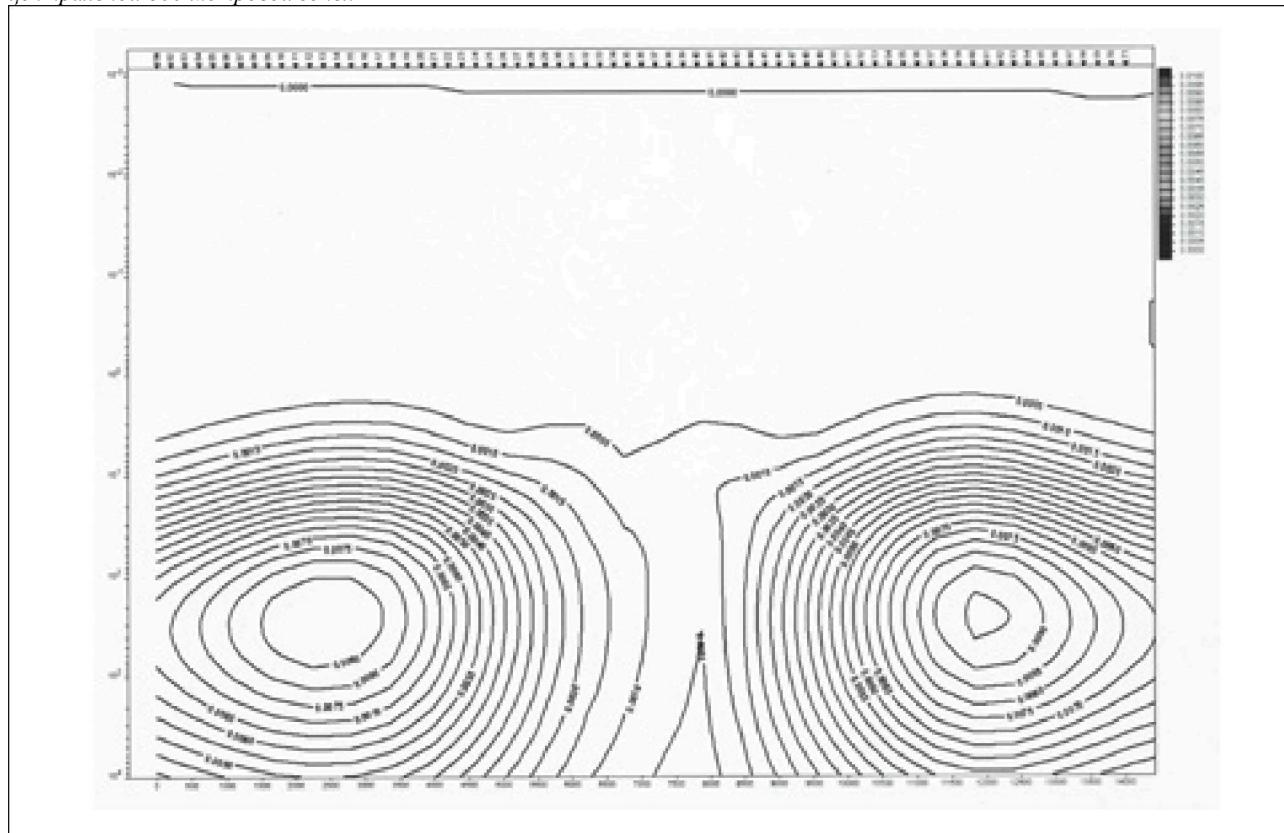


Рис. 8.2 Соответствующие магнитуды  $H_z$ .

## Несейсмические методы

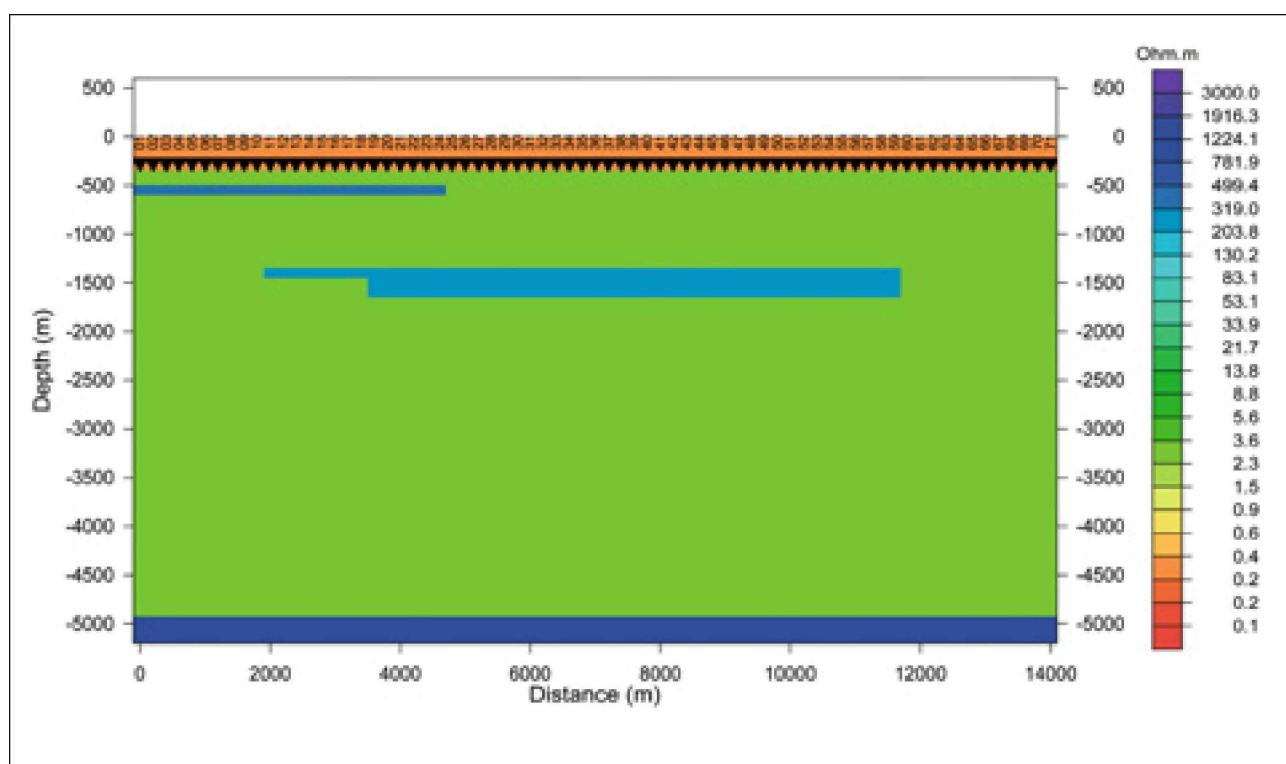


Рис. 9.1 Модель месторождения *Troll*, преобразованная для демонстрации эффекта промежуточного пласта, имеющего удельное сопротивление.

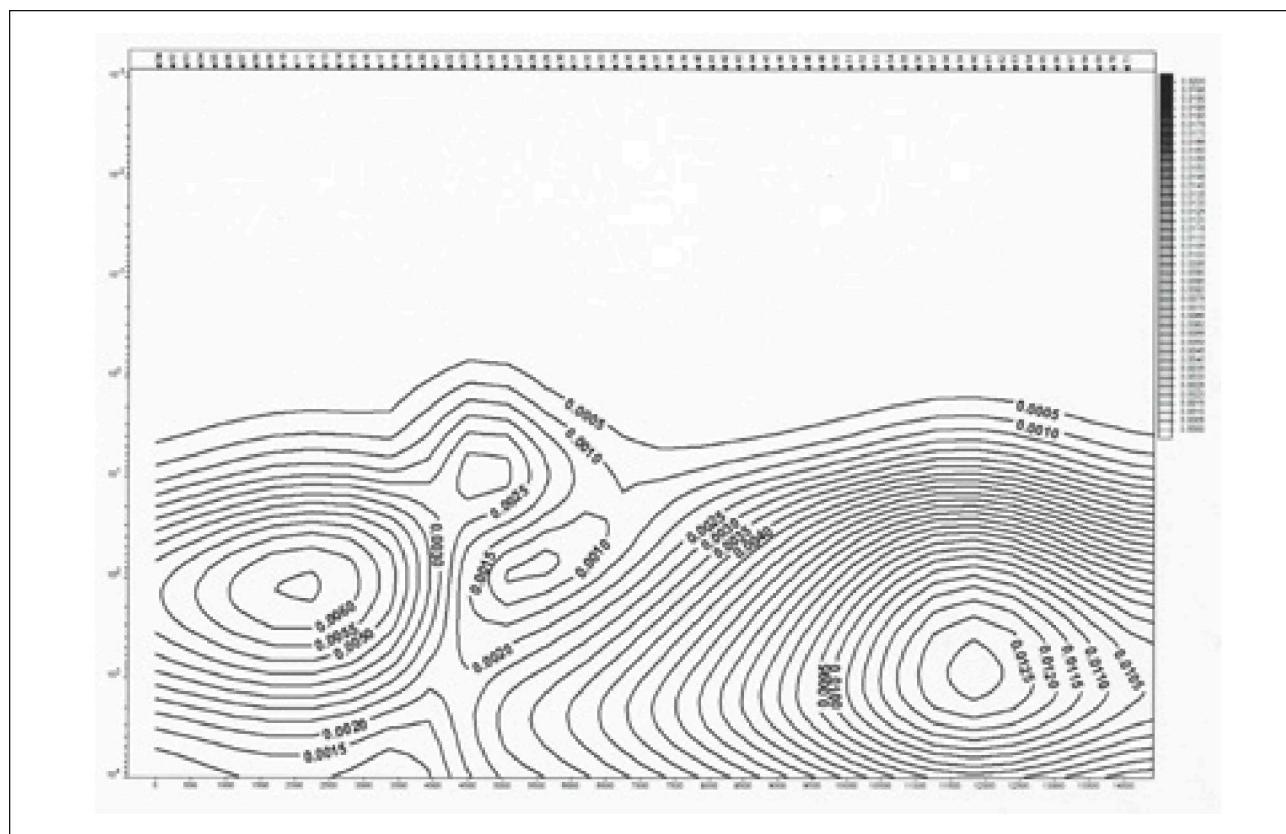


Рис. 9.2 Соответствующие магнитуды  $H_z$ .

## Несейсмические методы

Ошибка центрирования будет также отличаться от датчика к датчику так, что различное, меняющееся со временем смещение, которое должно быть принято каждым датчиком группы, регистрирующим едва различные свойства, ожидаемые в этой задаче, трудно или даже невозможно определить.

Максимально допустимая ошибка центрирования вертикального датчика составляет несколько минут дуги. Эта точность центрирования считается достижимой при тщательном конструировании и эффективной высокоточной регулировке, даже с возрастанием стоимости и увеличением сложности. Может быть использован менее дорогой, более простой, с более точной регулировкой подход, в котором Hz датчик точно вертикально подвешен и действует как демпфированный маятник (Fox and Ingelou, 2006). Демпфированный маятник динамически устойчив вблизи вертикального направления, таким образом, отклонения, вызванные вибрациями или потоками, исчезают в течение короткого времени. В принципе этот подход (комбинированный с точным измерением угла наклона и достаточным временем измерений) может уменьшить эффект ошибки центрирования до требуемого уровня. Так как большинство ожидаемых аномалий (особенно разница 4D измерений) малы, важность минимизации ошибки центрирования является очевидной. Точные Hz измерения теоретически достижимы. Это также достижимо и на практике, но для этого требуется хорошее проектирование измерительной техники, достаточные времена измерений и, возможно, новые алгоритмы обработки. Преимущества использования естественного поля и множества точных датчиков Hz включают: снижение затрат использованием судов общего назначения с небольшим водоизмещением в течение короткого периода, по сравнению с более крупными специализированными судами, требующимися для MCSEM, обычно арендуемыми на несколько лет; отсутствие надобности в контролируемом источнике или специальному буксируемому кабелю; меньший вес и меньшее количество оборудования, и, таким образом, более легкое развертывание работ; меньшая стоимость аппаратуры, что минимизирует стоимость утраченного по каким-либо причинам оборудования. Наряду с этим метод подключает дополнительные резервы для измерения и обеспечивает лучшее пространственное разрешение; более широкую полосу частот для более качественных инверсий; большую глубину исследований и отсутствие нежелательной, возможно не малой, отраженной волны от границы водаН воздух. Отсутствие этих волн в ММТ позволяет работать на малых глубинах с курсом (направление движения), с более высоким уровнем волн и вибрационным шумом, но используя преимущества от больших величин наблюдаемых в этом случае аномалий.

### Определение «полярности» (+/-) аномалии

Магнитуда аномалии Hz может расти из-за либо положительного контраста проводимости (вызванного залежью углеводородов), либо отрицательного контраста (зона большей проводимости, чем в окружающих породах). Однако, поскольку второй случай не предполагается в этом приложении, аномалия с магнитудой Hz может быть использована для того, чтобы сделать вывод о присутствии значимого положительного контраста удельного сопротивления.

Однозначное определение «полярности» аномалии проводимости может быть получено комбинацией Hz с горизонтальными ММТ магнитными полями Hx и Hy. Эта комбинация дает другой стандартный параметр MT, называемый вектором индукции (IV), который хорошо известен специалистам. IV (рис. 7) является комплексной величиной с действительной и мнимой частями. IV (в так называемом приближении Паркинсона) направлен к зонам отрицательного контраста удельного сопротивления и от зон положительного контраста удельного сопротивления.

Как показано на рис. 7, IV, измеренный на 2D сети станций над аномальным объектом, дает векторное поле, в котором каждые относительно уловимые аномалии могут быть определены.

Рис. 7 представляет одну плоскость куба IV в частотной области. Полезный диапазон частот ММТ в этом случае охватывает приблизительно 3 декады (период измерения от 10 сек до 1000 сек). Суммирующая три измеренных декады обычная измеренная плотность четырнадцати частот на декаду дает куб данных IV с 42 вертикальными элементами и горизонтальным размером, равным количеству использованных датчиков Nx x Ny. Существующая обработка и визуализация новейших 3D и 4D данных с небольшими изменениями могут быть применены к таким объемам данных.

Как только что упоминалось, IV требует измерения всех трех компонент магнитного поля. Нет необходимости измерять Hx и Hy во всех точках, поскольку Hx и Hy пространственно изменяются более медленно, чем Hz. Более того, Hx и Hy не обязательно измерять точно в тех же самых точках, что и Hz, при условии разумной удалённости между точками измерения. Эти факты обеспечивают значительную гибкость в выборе расстояний между датчиками, а также позволяют оптимизировать их состав (использовать много относительно недорогостоящих Hz датчиков и меньше более дорогостоящих Hx - Hy, или Hx-Hy-Hz ± Ex-Ey комплектов датчиков). Истинный азимут Hx и Hy обычно не является важным, поскольку оба горизонтальных датчика ортогональны, что практически может быть достигнуто, например, фиксированием их в жесткой рамке. 3D положение горизонтальных датчиков обычно известно с точностью до  $<1^\circ$ , и этого обычно достаточно. Намного более важна, как рассмотрено выше, точность ориентации вертикального датчика.

### Резервуарный мониторинг

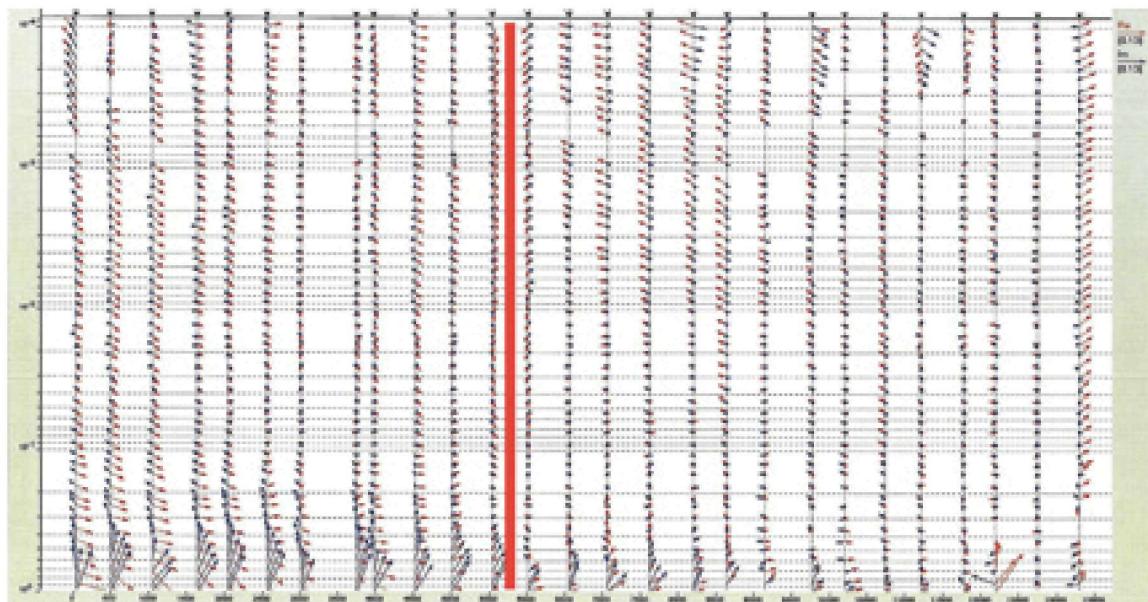
Основной принцип непрерывных измерений состоит в том, что могут быть определены достаточно надежно небольшие различия в измерениях по однажды полученной базовой линии съемки. Вышеупомянутый куб IV, когда непрерывно производятся измерения группой из шести фиксированных датчиков (много Hz, несколько Hx - Hy ± Ex - Ey), может быть проанализирован большим количеством существующих (или соответствующим образом приспособленных) алгоритмов, чтобы получить много различных динамических параметров, характеризующих эволюцию углеводородного месторождения в ходе эксплуатации. Целью может быть выявление зон шунтированных углеводородов, которые могут сохранять высокие значения удельного сопротивления по сравнению с деплетированными зонами, в которых углеводороды могут быть замещены соляным раствором с тем же удельным сопротивлением, что и вмещающие породы.

Например, рис. 8.1 и 8.2 показывают эффект затопления центральной 800-метровой зоны месторождения Troll (грубо 10% от размера по латерали) (рис. 5). Модель на рис. 5 более не является однородным телом, имеющим повышенное удельное сопротивление. Рисунок 8.2 может быть сопоставлен с рисунком 6.

### Эффект других резисторов в разрезе

На рис. 9 изображен промежуточный непрерывный (ограниченный) проводящий пласт, расположенный между морским дном и кровлей углеводородного скопления.

## Несейсмические методы



**Рис. 10** Псевдоразрез вектора индукции (IV), измеренного вдоль единственного профиля длиной 13.5 км АМТ поисково-разведочной съемкой. Расстояние между станциями 500 м. На каждой станции развернут независимый набор трех осевых магнитных датчиков  $H_x$  -  $H_y$  -  $H_z$ . Шкала магнитуд приведена справа в верхней части рисунка. Временной масштаб (слева) от  $10^{-4}$  с до  $10^0$  с. Вещественная часть IV (красные стрелки) показывает направление на относительно более проводящей зоны. Глубина увеличивается по мере уменьшения частоты. Направление в каждой точке измеренной частоты соответствует азимуту, который можно видеть на карте поверхности. Вертикальная проводящая зона (жирные красные линии) наглядно видна вблизи станции 5500. Магнитуды меньше  $-0.03$ , а также направления являются выдержаными от станции к станции. Известная взаимосвязь между действительной и мнимой компонентами IV (в работе не рассматривается) предоставляет дополнительную диагностическую информацию.

На рис. 9.2 изображён соответствующий профиль Hz. Новый локальный максимум появляется над латеральной границей промежуточного резистора; крайняя слева аномалия на рис. 6 остается на том же месте, ее гипоцентр смещается в частотной области в сторону более высоких частот, а ее магнитуда немного уменьшается. Крайняя справа аномалия на рис. 6 остается на том же месте; она немного увеличивается, а гипоцентр перемещается в частотной области в сторону более низких частот. Эти рисунки указывают, что метод Hz может быть полезен при идентификации резисторов на различных глубинах. Отметим, что выше приведенные модели являются двумерными. Полное 3D моделирование может показать аналогичную, но более детальную картину изменчивости 3D магнитуды Hz или IV. Отметим также, что IV является 3D параметром, который является ротационно-инвариантным, т. е. независимым от ориентации источника, датчика и объекта, что является важным преимуществом при обработке.

### Выводы

Концепция метода ММТ  $H_z$ , описанная здесь, представлена как теоретически и практически выполнимая при условии грамотного конструирования аппаратуры, достаточной продолжительности наблюдений и применения соответствующих алгоритмов обработки. Концепция представляет собой более недорогую альтернативу методу MCSEM. Другие применения описываемой технологии могут быть в мониторинге резервуара при помощи статического массива донных датчиков.

### Литература

- Chave, A.D. et al. [1991] Electrical Exploration Methods for the Seafloor. In Nabighian, M. (Ed.) *Investigations in Geophysics*, No. 3 - Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Vol. 2, Application, Parts A and B. *SEG publication*.
- Farrelly, B. et al. [2004] Remote characterization of hydrocarbon filled reservoirs at the Troll Field by Sea Bed Logging. *EAGE Fall Research Workshop*, Rhodes, Greece.
- Fox, L. and Ingerov, O. [2006] Detection of resistivity of offshore seismic structures mainly using vertical magnetic component of earth's naturally varying electromagnetic field. *International Patent Application PCT/CA2006/000042*.
- Lam, H. et al. [1982] The response of perturbation and induction arrows to a three-dimensional buried anomaly, *Geophysics*, 47, 1, 51-59.
- McBarnet, A. [2007] Seismic shift in EM forces. *Offshore Engineer*, August, 21-24.
- Srnka, L.J. [2001] Remote Reservoir Resistivity Mapping. *International Patent Application WO 01/20366 A1*.
- Vozoff, K. [1991] The magnetotelluric method. In Nabighian, M. (Ed.) *Investigations in Geophysics*, No. 3 - Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Vol. 2, Application, Parts A and B. *SEG publication*.