

## Многодисциплинарная проблема

### Развитие электромагнитного метода переходных процессов. Developments in the transient electromagnetic method

Антон Циолковский<sup>1</sup> (Anton Ziolkowski) описывает то как развивалась его заинтересованность в использовании электромагнитного метода переходных процессов в целях разведки и добычи углеводородов от первоначальных исследований вплоть до образования фирмы для коммерциализации метода.

Понимание эффекта диффузного распространения нуждается в механизмах, которые очень отличаются от тех, которые полезны для понимания распространения волны. Удобной начальной точкой является аналитическая функция, которая описывает импульсную характеристику (реакцию на импульсное возмущение) земного полупространства как функцию зависимости удельного сопротивления земли от координаты источника вдоль профиля. Эта функция имеет вид, очень схожий с измеренной импульсной характеристикой земли и может быть изменена так, чтобы позволить нам оптимизировать параметры сбора данных. Для систем электромагнитного метода переходных процессов (МТЕМ) исходная временная функция должна иметь полосу пропускания приблизительно в две декады, но которая изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния источник-приемник. Использование этих принципов для данных метода переходных процессов восстанавливает импульсные характеристики, из которых можно легко отделить воздушную волну.

Движение электрического тока в земле определяется объемным удельным сопротивлением пород, на которое влияют насыщающие породу флюиды. Например, насыщенные углеводородами пористые породы имеют большие значения сопротивлений, чем те же самые породы, насыщенные морской водой. Следовательно, цель разведочных работ состоит в том, чтобы определить, присутствуют ли углеводороды, измеряя удельное сопротивление геологических формаций. В этой статье говорится о некоторых недавних событиях в использовании электромагнитного метода переходных процессов для добычи и разведки углеводородов.

Этот метод использовался много лет для разведки полезных ископаемых, но еще не стал стандартным методом разведки и добычи углеводородов. Общепринятая работа по теории метода была написана Kaufman и Keller (1983), которые подвели итог двадцатилетней работе, выполненной в

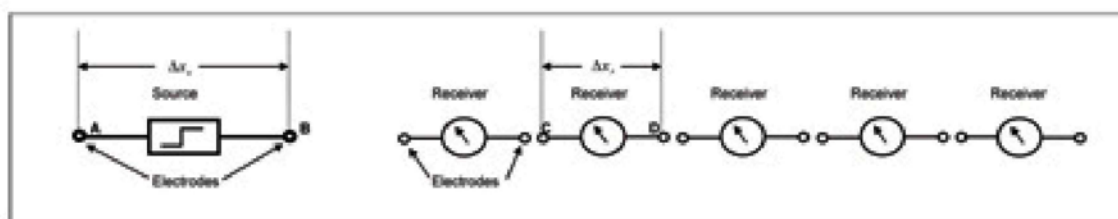
России и Северной Америке. Книга Strack'a (1992) отразила современное положение дел в LOTEM съемке (электромагнитный метод переходных процессов на дальних выносах) для наземных изысканий. Его подход был расширен, особенно в Университете Кельна (e.g. Helwig, 2000). Применение метода переходных процессов для морской среды проводил Физический факультет Университета Торонто (e.g. Chave и др., 1991), особенно для поиска залежей газогидратов в глубоководных участках (e.g. Schwalenberg и др.).

Университет Эдинбурга участвовал в научно-исследовательском проекте, названном *Оконтуривание и мониторинг нефтяных резервуаров, используя сейсмические и электромагнитные методы*, частично финансируемый Европейской комиссией по программе THERMIE и также спонсируемый предприятием Elf, Каледония. Bruce Hobbs, имеющий многолетний опыт в области электромагнитной индукции и магнитотеллурики, был моим коллегой в Эдинбурге. Университетскими партнерами были немецкий Montan Technologie, Университет Кельна и Compagnie Generale de Geophysique. Шестилетний проект закончился в 1998 г., собрав два набора данных по подземному газовому резервуару во Франции, но, не достигнув каких-нибудь значительных результатов. Результаты, которые мы получили, выглядели бессмысленными для меня и Брюса.

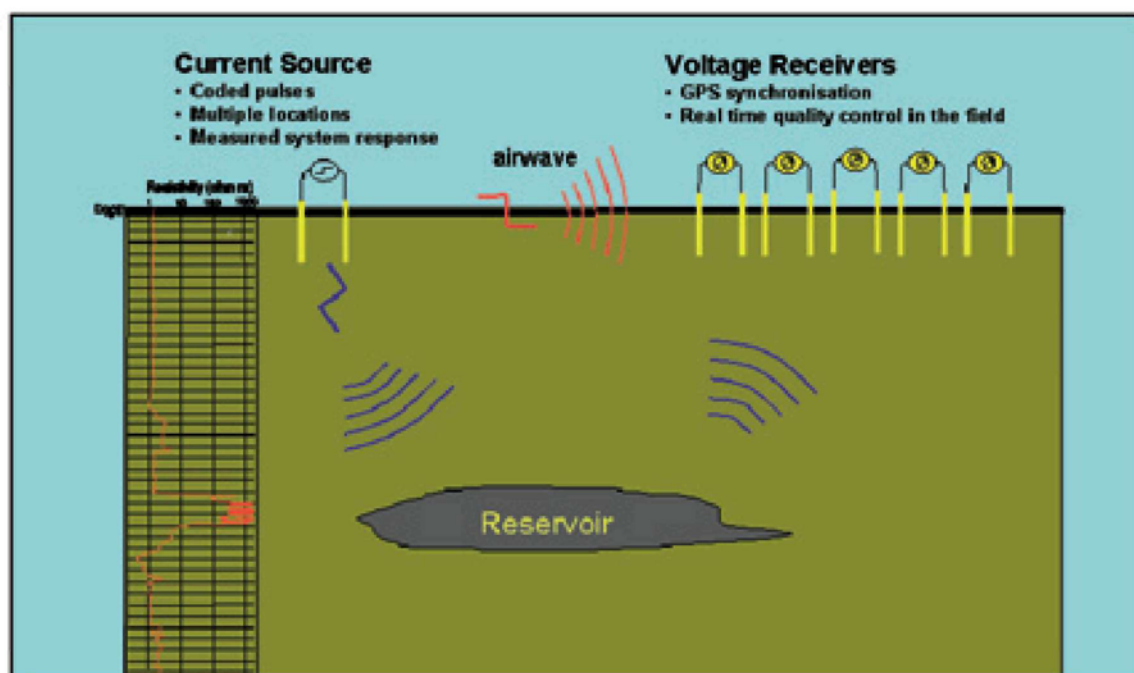
После того как проект THERMIE был закончен, Брюс и я начали новый проект по анализу данных с нашим магистром David Wright. Мы обнаружили погрешность в определении времени вступления порядка 1 мс. Как только эти ошибки были устранены (Wright и др., 2002; Wright, 2003), приблизительные оценки импульсных характеристик земли могли быть получены. Наконец, данные стали иметь для нас смысл. Мы сформулировали улучшенный метод сбора и обработки данных, который привел к патентам (напр., США 6,914,433). Фирма МТЕМ была сформирована, как отделившаяся от Университета Эдинбурга в ноябре 2004 г., для коммерциализации этой технологии.

<sup>1</sup> MTEM, 40 Sciennes, Edinburgh EH9 1NJ, UK, [www.mtem.com](http://www.mtem.com).

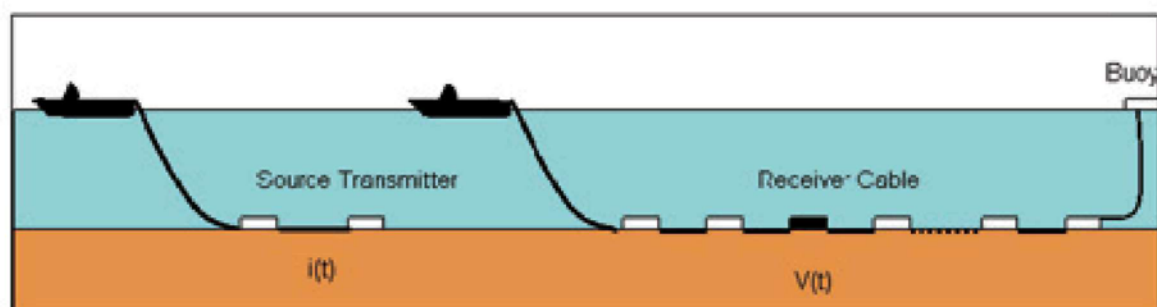
# Многодисциплинарная проблема



(a)



(b)



(c)

**Рис. 1** (a) План типичной наземной МТЕМ установки с токовым бипольным источником и его двумя электродами А и В и линией приемников, расположенной на одной прямой с источником, измеряющих потенциал между приемными парами электродов, например, С и D. (b) Вид наземной МТЕМ установки с бипольным источником и рядом наземных бипольных приемников, синхронизируемые с помощью GPS, и с проверкой качества, производимой в режиме реального времени; типичные длины бипольных источников и приемников составляют 200 м. (c) Вид возможной морской МТЕМ установки с бипольным источником на морском дне и отдельным кабелем с бипольными приемниками, синхронизируемые с помощью GPS, и с проверкой качества, производимой в режиме реального времени; типичные длины бипольных источников и приемников составляют 200 м.

## Многодисциплинарная проблема

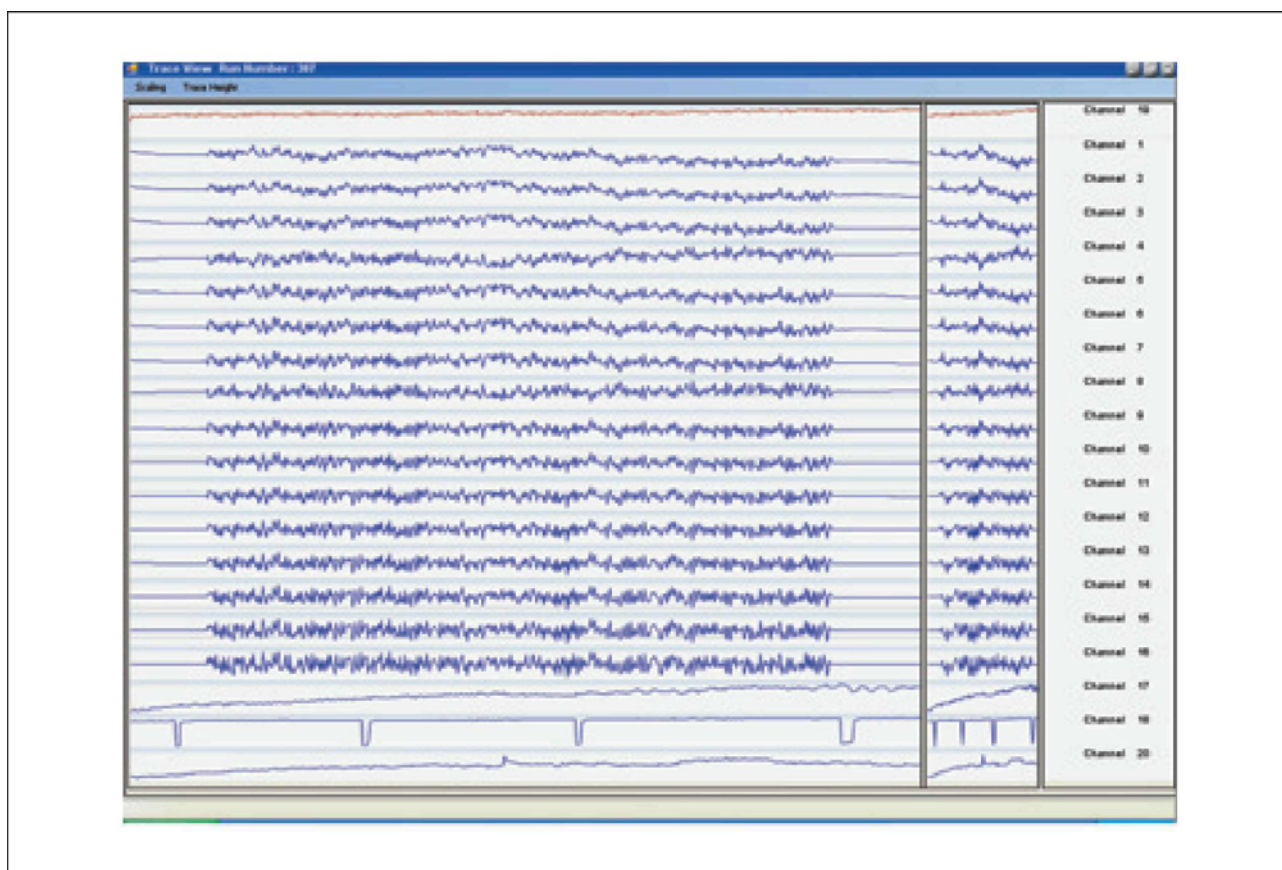
## Электромагнитный метод многопереходных процессов

Сущность электромагнитного метода многопереходных процессов (МТЕМ) состоит в том, что и полученное напряжение, и исходный ток измеряются вместе, и импульсную характеристику земли восстанавливают методом деконволюции из этих двух измерений.

План установки показан на рис. 1 (а). Изменение тока, типично ступенчатая функция или конечной длины сигнал, такой как псевдослучайная двоичная последовательность (PRBS), вводится, а затем измеряется и регистрируется между двумя питающими электродами А и В. Зависящий от времени отклик по электрическому напряжению между каждой парой приемных электродов, например С и D, также измеряется одновременно. Если отклик достигает устойчивого состояния до следующего изменения в токе, который прикладывается на источнике, полный отклик измеряется, и это есть свертка,

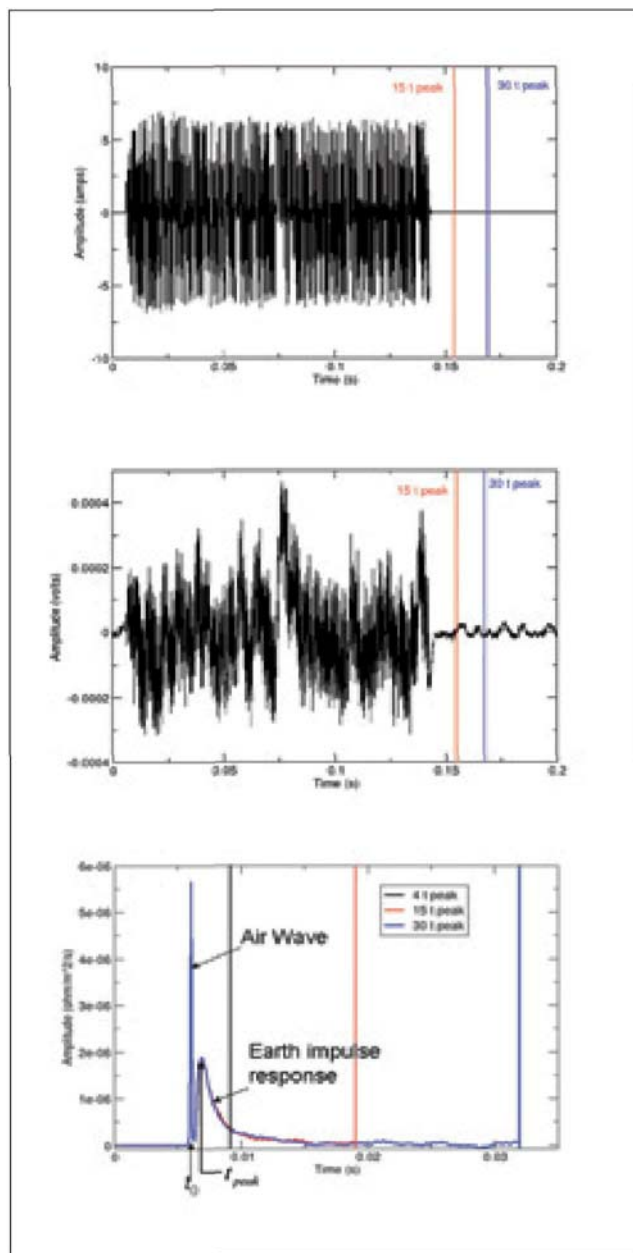
$$v(x_C, x_D; x_A, x_B, t) = \Delta x_r \Delta x_r i(x_C, x_D; x_A, x_B, t) * g(x_C, x_D; x_A, x_B, t) + n(x_C, x_D, t),$$

в которой  $v(x_C, x_D; x_A, x_B, t)$  – измеренная чувствительность по напряжению;  $i(x_C, x_D; x_A, x_B, t)$  – измеренный входной ток; звездочка \* обозначает операцию свертки;  $g(x_C, x_D; x_A, x_B, t)$  – неизвестная импульсная характеристика земли и  $n(x_C, x_D, t)$  – некоррелируемый шум;  $x_A$  и  $x_B$  – местоположение питающих электродов,  $x_C$  и  $x_D$  – местоположение приемных электродов,  $\Delta x_r$  – длина питающего биполя (диполь с конечным расстоянием между электродами),  $\Delta x_r$  – длина приемного биполя и  $t$  – время. Отметим, что свертка является интегралом по времени, так что импульсная характеристика  $g(x_C, x_D; x_A, x_B, t)$  имеет размерность Ом/м<sup>2</sup>/с в единицах СИ. Исходный ток и полученное электрическое напряжение регистрируются идентичными устройствами, эффекты которых устраняют при последующей деконволюции.



**Рис. 2** Снимок типичной морской записи: выносы увеличиваются от нижней части снимка к верхней. Только 16 из 30 приемников находятся в воде; оставшаяся часть кабеля находится на морском судне.

## Многодисциплинарная проблема



**Рис 3** (а) Текущее измерение для псевдослучайной двоичной последовательности исходной временной функции. Отсчет времени, равный 0, соответствует началу записи. После следует известный интервал  $t_0$  до того, как придет сигнал от источника;  $t_0$  известен как первое вступление. (б) Отклик приемника на входной сигнал, показанный на рис. (а). (с) Результат деконволюции, демонстрирующий импульсную характеристику земли, и шум для трех значений времени прихода. Максимум возмущенной волны приходится на первое вступление  $t_0$ . Отметим, что рис. (с) сознательно изображен в другом временном масштабе, нежели (а) и (б), чтобы дать возможность ясно увидеть особенности импульсной характеристики.

Полное сопротивление цепи, в общем, есть комплексная величина, и, следовательно, исходный ток находится не в фазе с приложенным напряжением. Отклик в уравнении (1) зависит от приложенного тока, и именно это есть та величина, которую мы измеряем: эффекты комплексного сопротивления, которые автоматически принимаются во внимание.

Для наземного случая схема установки показана на рис. 1 (б), для морского случая возможная схема установки показана на рис. 1 (с). В обоих случаях питающие и приемные электроды находятся на одной линии. Положения электродов на акватории, или регс, известны из исследований. Морские акустические транспондеры присоединены к кабелю на местоположения электродов, и определяется их местонахождение, используя коммерческую подводную акустическую позиционирующую систему. Вся установка может быть сдвинута вдоль профиля для его продолжения, как и в 2D сейсмическом методе отраженных волн. Необходимо иметь выносы в четыре раза больше исследуемого объекта, чтобы определить его кровлю и подошву. В основном мы используем около 40 приемных каналов с одинаковым шагом между ними. Этот выбор в некоторой степени случаен, но было обнаружено, что он дает хорошее разрешение по латерали, равное приблизительно половине шага между приемниками. Для объектов, расположенных на глубине 1 км, длина приемного биполя должна быть 100 м, и расстановка приемников должна быть четырехкилометровой длины. На поверхности суши используется система *roll-along*, сходная с сейсмическим методом отраженных волн.

У метода есть две особенности – это точное определение времени и проверка качества, производимая в режиме реального времени. Источники и приемники постоянно синхронизируются с помощью GPS, который обеспечивает очень точное определение времени, таким образом, избегая проблем с синхронизацией оборудования, используемого в проекте THERMIE. Данные с источника и всех приемников передаются на станцию (наземные исследования) или на морское судно для их анализа в реальном времени. Таким образом, отношение сигнал-шум данных может быть проконтролировано в реальном времени. На рис. 2 показан снимок морских данных, демонстрирующих отношение сигнал-шум. Так как система заземлений линейная, то в уравнении (1) применяется свертка; то есть уравнения Максвелла – линейные. В частотной области свертка соответствует умножению, тогда как деконволюция соответствует делению. Типичный пример наземных данных – входного измеренного тока, выходного измеренного электрического



## Многодисциплинарная проблема

электрического напряжения на одном приемнике и результат деконволюции (чтобы получить импульсную характеристику земли для пары источник-приемник) - показан на рис. 3 (a), (b) и (c), соответственно. В импульсной характеристике есть импульс в начальный момент времени, который обычно называется «воздушная волна» - это чистый индукционный эффект, вызванный магнитным полем, порожденным током в электрическом бипольном источнике, и этот импульс регистрируется мгновенно на всех приемниках. Это сопровождается импульсной характеристикой земли.

Шум состоит из случайного шума и неслучайного промышленного шума от линий электропередач и железных дорог, который обычно имеет больший порядок величин, чем случайная компонента. Этот шум может быть уменьшен рядом способов, включая суммирование. Собственная частота и гармоники промышленного шума часто не постоянные, и фаза каждой из этих частот также меняется по произвольному закону.

Псевдослучайные двоичные последовательности (PRBSs) использовались электротехниками, по крайней мере, с 1950-х годов (например Zierler, 1959) и были твердо установлены к 1960-м годам (например Golomb, 1967). PRBS - это последовательность, в которой элементы принимают два значения, скажем +1 и -1, в псевдослучайном целом числе, кратном выбранному временному интервалу  $\Delta t$ . (На каждом временном отсчете может быть рассмотрено, что подброшенная монета, например, выпадает решкой, что соответствует +1, или орлом, что соответствует -1). Условно последовательность состоит из непрерывного ряда одинаковых циклов, каждый длиной  $N = 2^n - 1$  отсчетов, где  $n$  - целое число, известное как порядок PRBS. Duncan и др. (1980) предложили использование PRBS как входной сигнал в электромагнитном методе. Автокорреляционная функция этой последовательности состоит из серии максимумов, разделенных циклическим периодом  $N\Delta t$ . Duncan и др. распространили их PRBS последовательность и провели процедуру взаимной корреляции полученного сигнала с известной PRBS последовательностью. Helwig (2000) использовал последовательность нескольких циклов и также корреляцию данных с известной PRBS.

Как обсуждалось Wright'ом и др. (2006), мы использовали единичный цикл для деконволюции с измеренным током на входе. Единичный цикл имеет равномерный спектр во временном диапазоне.

$$\frac{1}{N\Delta t} \leq f \leq \frac{1}{2\Delta t}. \quad (2)$$

Выбирая  $\Delta t$  и  $n$  можно сделать спектр входного сигнала равномерным в желаемом диапазоне частот. PRBS в электромагнитном методе переходных процессов используется для тех же целей, что и свип-сигнал в вибрационной сейсморазведке. PRBS удобен для использования в электромагнитном методе, потому что отдаваемая мощность постоянна для продолжительности последовательности, и время переключения составляет порядка микросекунды, что намного меньше, чем временной интервал изучения.

### Максимизирование сигнала

Для этой цели удобно упростить выражение (1) до следующего:

$$v(t) = \Delta x_s \Delta x_r i(t) * g(t) + n(t),$$

из которого мы получаем отношение сигнал-шум:

$$\frac{|Signal|}{|Noise|} = \frac{|\Delta x_s \Delta x_r i(t) * g(t)|}{|n(t)|}. \quad (3)$$

$$\quad (4)$$

Если исходный источник тока является идеальным PRBS из  $N$  отсчетов, каждый продолжительностью  $\Delta t$ , переключая между  $+I$  and  $-I$ , деконволюция идеально сжимает сигнал к единичному импульсу продолжительностью  $\Delta t$ , и амплитуда сигнала становится равной:

$$|Signal| = NI\Delta x_s \Delta x_r \Delta t g(t). \quad (5)$$

То есть мы получаем импульсную характеристику земли, определенную коэффициентом  $NI\Delta x_s \Delta x_r \Delta t$ . Очевидно, что нам нужно сделать максимальными все члены этого коэффициента.

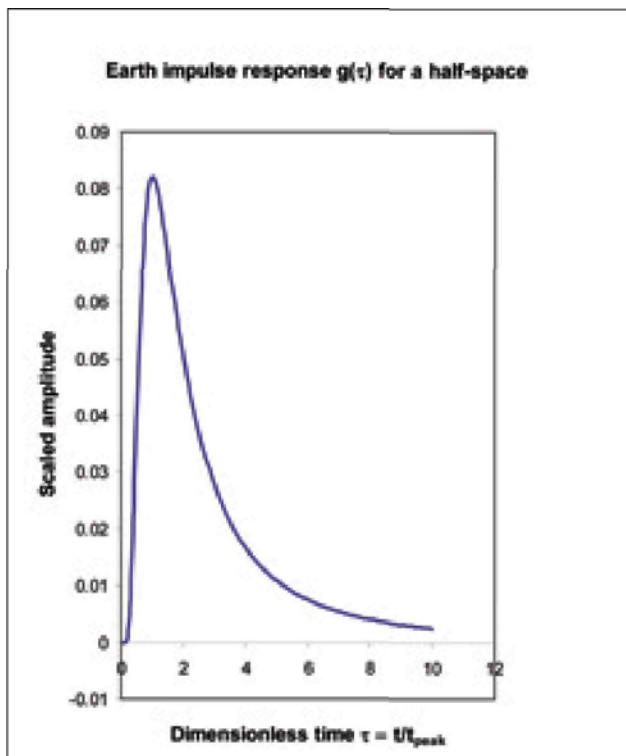
Для моделирования и инверсии данных удобно, если источник и приемник можно рассматривать в качестве диполя. На практике это означает, что  $\Delta x_s$  и  $\Delta x_r$  не должны быть больше одной пятой выноса. Очевидно,  $N$  должен быть большим, и значение тока  $I$  должно быть как можно более высоким. Выбор временного интервала  $\Delta t$  не так очевиден и требует анализа.

### Импульсная характеристика земли

Рассмотрим отклик в полупространстве. Реакция на ступенчатые возмущения удельного сопротивления полупространства ( $\rho$ , Ом-м) была выведена Weir (1980).

$$g(\rho, r, t) = \frac{\rho}{8\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-r^2}{4c^2 t}\right) t^{-\frac{3}{2}} \text{ ohms/m}^2/\text{s}, \quad (6)$$

## Многодисциплинарная проблема



**Рис 4** Импульсная характеристика полупространства как функция безразмерного времени  $\tau = t/t_{peak}$ . Вид функции очень похож на вид импульсной характеристики земли измеренной на реальных данных (см. рис. 2 (с)). Чтобы получить правильную зависимость для совокупности удельного сопротивления ( $\rho$ , Ом-м) и выноса ( $r$ , м), умножают амплитудную шкалу на  $5.65 \cdot 10^6 \rho^2 / r^5$  и временную шкалу на  $4\pi 10^{-8} r^2 / \rho$ ; результатом служит импульсная характеристика в Ом/м<sup>2</sup>/с.

Wilson (1997) видоизменил ее, чтобы получить импульсную характеристику (6), в котором  $r$  – вынос в метрах,  $c^2 = \rho/\mu$ , магнитная проницаемость  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м и  $t$  – время. Эта функция имеет максимум во времени:

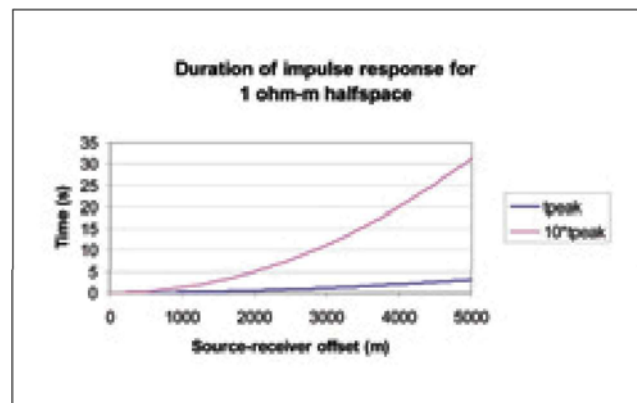
$$t_{peak} = \frac{\mu r^2}{10\rho} \quad (7)$$

Подставляя  $\tau = t/t_{peak}$  в уравнение (6), получаем:

$$g(\rho, r, \tau) = 5.65 \cdot 10^6 \frac{\rho^2}{r^5} \exp\left(-\frac{5}{2\tau}\right) \tau^{-\frac{5}{2}}. \quad (8)$$

Эта функция показана на рис. 4 вне масштаба перед экспонентой. Ее вид очень похож на функцию импульсной характеристики земли (рис. 3 (с)) и, таким образом, дает аналитическое приближение реальным данным.

Чтобы отделить импульсную характеристику земли от воздушной волны (см. рис. 3 (с)), требуется около 10 отсчетов.

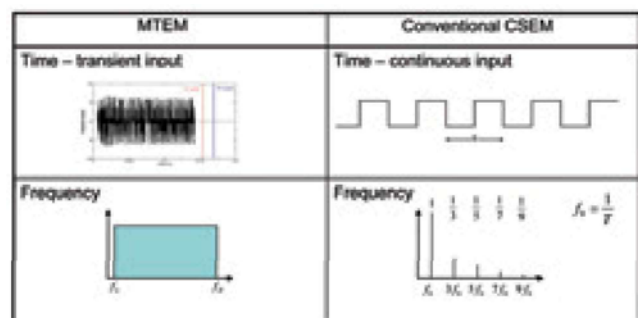


**Рис 5** Длительность импульсной характеристики, как функция от выноса для полупространства с удельным сопротивлением 1 Ом-м. Синяя кривая показывает время  $t_{peak}$ , красная кривая показывает время  $10t_{peak}$ , когда закончена большая часть отклика. В идеале  $t_{peak} = 10\Delta t$ ; следовательно, исходная скорость передачи данных  $1/\Delta t = 10/t_{peak}$  должна быть настроена для выноса, чтобы сделать максимальной чувствительность по напряжению на приемнике.

Таким образом, мы можем определить интервал отсчета:

$$\Delta t = \frac{t_{peak}}{10}. \quad (9)$$

Уравнение (7) устанавливает, что максимум импульсной характеристики земли приходит на время, пропорциональное  $r^2$ . Следовательно,  $\Delta t$  должно быть пропорционально  $r^2$ .

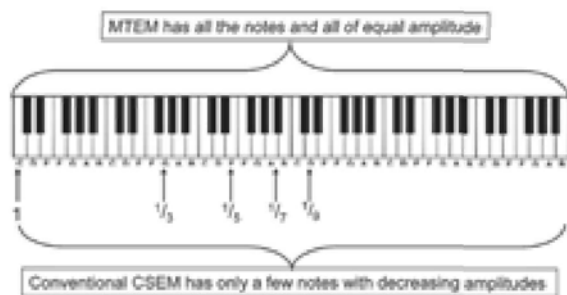


**Рис 6** Входные сигналы для MTEM и стандартного CSEM методов во временной и частной областях. MTEM система обычно использует PRBS порядка  $n = 12$  и имеет  $N = 2^n - 1 = 4095$  отсчетов; ширина полосы пропускания частоты от  $f_L = 1/N\Delta t$  до  $f_H = 1/2\Delta t$ . Фактические величины этих частот зависят от значения  $\Delta t$ , которое зависит от выноса, как показано на рис. 5. Отношение самой высокой к самой низкой частоте  $f_H/f_L$  отличается более чем на две декады для PRBS порядка 11 или выше.

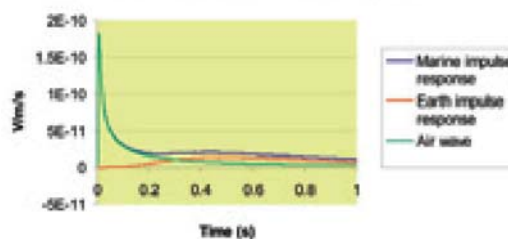
## Многодисциплинарная проблема

Параметр	Стандартный CSEM	Морской MTEM
Длина бипольного источника	200-300 м	200-300 м
Интервал бипольного источника	~100 м	200 м
Длина бипольного приемника	~8 м	200 м
Интервал между приемниками	~1 км	200 м
Амплитуда тока источника	~1,000 А	~1,000 А

Табл. 1 Сравнение параметров получения данных стандартным CSEM и морским MTEM методами.



Decomposition of Marine Impulse Response



**Рис. 7** Полоса пропускания MTEM составляет около двух декад в выбранном выносном диапазоне или более шести октав, в то время как стандартный CSEM, использующий традиционный меандр, ограничен собственной частотой и нечетными гармониками.

Если  $\Delta x_s$  and  $\Delta x_r$  являются пропорциональными  $r$ , амплитуда сигнала затухает как  $1/r$ , что не так плохо.

Время - другая основная компонента, необходимая для хорошего отношения сигнал-шум. Из уравнения (6) можно видеть, что импульсная характеристика земли является бесконечно длинной: она не будет достигать значения, равного нулю. В равной степени, реакция на ступенчатые возмущения никогда не будет установившейся. Однако в действительности существует момент времени, когда импульсная характеристика становится слишком малой для ее измерения, и мы можем это видеть на рис. 3 (с), где на больших временах амплитуда сигнала слишком мала, чтобы отличить ее от шума. Следовательно, для практического применения импульсная характеристика имеет конечную продолжительность. На рис. 4 можно увидеть, что большая часть безразмерного отклика заканчивается к  $\tau=10$  или к истинному времени  $10t_{peak}$ . Определив интервал дискретизации в уравнении (9), очевидно, что набор из 100 отсчетов будет достаточен, чтобы описать отклик на любом выносе, и что продолжительность полного отклика пропорциональна  $r^2$ . На рис. 5 видно, как продолжительность импульса меняется с выносом.

**Рис. 8** Производная по времени реакции на ступенчатые возмущения электрического поля на морском дне в 2 км от 1 А-м дипольного источника; модель - стометровый пласт морской воды, лежащий на полупространстве с УЭС 1 Ом-м. Синяя кривая: полная импульсная характеристика; зеленая кривая: компонента воздушной волны; красная кривая: импульсная характеристика земли. Все кривые бесконечно продолжаются со временем; для этих параметров самая важная часть отклика заканчивается примерно на 1 с.

### Отношение сигнал-шум и улучшение этого показателя в ходе обработки

Первым способом увеличить отношение сигнал-шум является повторение эксперимента, скажем  $m$ -раз, и суммировать восстановленную импульсную характеристику. Если шум случайный, как на рис. 3 (с), увеличение сигнал-шум есть корень из  $m$ . Другой способ - это увеличить длину PRBS: этот метод является более предпочтительным, чем суммирование, потому что добавляется меньше шума к результату для того же самого увеличения сигнала. Время для получения данных будет равняться сумме времени PRBS и времени для записи полной импульсной характеристики - это аналог «времени прослушивания» в вибросейсморазведке. Для коротких PRBS улучшение отношения сигнал-шум почти равно  $N$  - числу отсчетов в PRBS.

## Многодисциплинарная проблема

Как только PRBS становится длиннее, добавляется больше шума к измерениям для того же самого «времени прослушивания», и отношение сигнал-шум возрастает медленней, стремясь к корню из  $N$  при очень большом  $N$ . Для каждой пары источник-приемник восстанавливается импульсная характеристика. Это может быть интегрировано, чтобы получить реакцию на ступенчатые возмущения. Полная инверсия на основе формы волны может быть применена или к импульсной характеристике, или к реакции на ступенчатые возмущения, чтобы восстановить удельное сопротивление (Ziolkowski и др., 2007).

### МТЕМ и стандартный CSEM

В последние годы было проведено множество морских электромагнитных изысканий с контролируемым источником (CSEM) особенно в глубоководных участках с целью минимизации риска от бурения непродуктивной скважины (например Smit и др., 2006). В конце 2005 г. МТЕМ метод был опробован в мелководном участке Ферт-оф-Форт, Шотландия (Ziolkowski и др., 2006). Эта проверка была удачной и привела к развитию оборудования для размещения на континентальном шельфе. Стандартный CSEM использует удаленный независимый приемник на морском дне, который питается от батарей и ведет отсчет времени благодаря наличию часов. Часы синхронизируются с GPS до того, как приборы помещаются на дно. Приемники обычно измеряют магнитное поле, две горизонтальных компоненты электрического поля и иногда вертикальную компоненту электрического поля. В основном, нормальное электрическое поле используется для изучения: оно должно быть построено из двух горизонтальных компонент. Srnka и др. (2006) дают прекрасное описание метода, позволяя вывести параметры сбора данных. Источник буксируется приблизительно в 50 м от морского дна и движется со скоростью 1.5 узлов или около 46 метров в минуту. Входной сигнал – обычно непрерывный меандр, хотя в последние годы были сделаны усовершенствования. Таким образом, приемники по существу измеряют установившийся отклик на непрерывный периодический сигнал. Период обычного меандра составляет 1-4 с. Постоянное движение источника мешает отклику из точно установившегося места, и там присутствует доплеровский эффект, который обычно не принимается в расчет. В настоящее время отсутствует проверка качества, производимая в режиме реального времени. Качество данных неизвестно, до тех пор, пока приемники не

вернут обратно на морскую поверхность и не выгрузят данные. Полученные данные разрезают приблизительно по 1-2 минуты длиной. Период 4 с у меандра приводит к отклику на 15-30 циклов исходного входного сигнала. Для сравнения МТЕМ данные можно увидеть в режиме реального времени; и время, необходимое для получения импульсной характеристики с хорошим отношением сигнал-шум, может быть задано из обстоятельств.

В табл. 1 сравниваются морские МТЕМ и обычные CSEM параметры сбора данных. На рис. 6 сравниваются сигналы МТЕМ и CSEM во временной и частотной областях. Полоса пропускания сигнала МТЕМ настроена так, чтобы соответствовать полосе пропускания импульсной характеристики, как сказано выше. Обычный CSEM сигнал имеет собственную частоту и нечетные гармоники. Сравнение частотной области возможно легче понять при рассмотрении иллюстрации клавиатуры на рис. 7. Так как спектр обычных CSEM данных неполный, то невозможно создать импульсную характеристику из данных.

### Морская воздушная волна

Несколько слов должно быть сказано о морской воздушной волне, которая является известной проблемой в стандартном CSEM: непрерывный полученный от земли сигнал неизменно зашумлен сигналом благодаря наличию воды, включая чистый индукционный эффект в воздухе. В глубоководных участках зашумленный сигнал, или «воздушная волна», может быть проигнорирован из-за затухания в воде. В мелководных участках воздушная волна для стандартного CSEM является проблемой, и много усилий были посвящены развитию методов для ее преодоления, включая разделение волнового поля (например Amundsen, 2003).

Для МТЕМ в мелководных участках импульсная характеристика может быть разложена на две главные компоненты: воздушная волна и импульсная характеристика земли. Характеристики этих двух компонент различны, и различия могут использоваться, чтобы разделить импульсную характеристику земли от суммарного отклика. Это представление проиллюстрировано на рис. 8, где показан простой слой над моделью полупространства. Разложение зависит от модели, и не каждый случай также ясен, как это пример.



## Многодисциплинарная проблема

## Выводы

Использование МТЕМ для добычи и разведки углеводородов находится в стадии становления. Электромагнитный метод многопереходных процессов. Понимание эффекта диффузного распространения нуждается в механизмах, которые очень отличаются от тех, которые полезны для понимания распространения волны. Удобной начальной точкой является аналитическая функция, которая описывает импульсную характеристику земного полупространства как функцию зависимости удельного сопротивления земли от координаты источника вдоль профиля. Эта функция имеет вид, очень схожий с измеренной импульсной характеристикой земли и может быть изменена так, чтобы позволить нам оптимизировать параметры сбора данных. Для систем электромагнитного метода переходных процессов исходная временная функция должна иметь полосу пропускания приблизительно в две декады, но которая изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния источник-приемник. Использование этих принципов для данных метода переходных процессов восстанавливает импульсные характеристики, из которых можно легко отделить воздушную волну.

## Благодарности

Я благодарен Andrew McBarnet за предоставление мне возможности представить эту статью, также я благодарен анонимным рецензентам за их полезные комментарии, критические отзывы и предложения. Я благодарен Bruce Hobbs, David Wright и Guy Hall за многочисленные интересные дискуссии. Идеи, представленные здесь, превращены в аппаратные средства, программное обеспечение, операции и реальные данные моими коллегами в МТЕМ. Оптимизация параметров сбора данных является объектом МТЕМ заявки на патент.

## Литература

- Amundsen, L. [2003] International Patent Application, Publication No. WO 03/100467 A1.  
 Archie, G. E. [1942] The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining some Reservoir Characteristics. *J. Petrol. Technol.* 5, 1-8.  
 Chave, A.D., Constable, S.C., and Edwards, R.N. [1991] Electrical exploration methods for the seafloor. In Nabighian, M. (Ed) *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Vol 2. *Soc. Explor. Geophys.*, Tulsa., 931-966.  
 Constable, S. and Weiss, C.J. [2006] Mapping thin resistors and hydrocarbons with marine EM methods: Insights from 1D modelling. *Geophysics*, 71, 2, G43-G51.  
 Duncan, P.M., Hwang, A., Edwards, R.N., Bailey, R.C., and Garland, G.D. [1980]

- The development and applications of a wide band electromagnetic sounding system using a pseudo-noise source. *Geophysics*, 45, 1276-1296.  
 Edwards, R.N. [1997] On the resource evaluation of marine gas hydrate deposits using sea-floor transient electric dipole-dipole methods. *Geophysics*, 62, 63-74.  
 Edwards, R.N. and Chave, A.D. [1986] A transient electric dipole-dipole method for mapping the conductivity of the sea floor. *Geophysics*, 51, 984-987.  
 Eidesmo, T., Ellingsrud, S., MacGregor, L.H., Constable, S., Sinha, M.C., Johansen, S., Kong, F.N., and Wester-dahl, H. [2002] Sea Bed Logging (SBL), a new method for remote and direct identification of hydrocarbon filled layers in deepwater areas. *First Break*, 20, 144-152.  
 Golomb, S.W. [1967] *Shift register sequences*. Holden-Day, San Francisco (Revised edition, Laguna Hills, CA, Aegean Park Press, 1982).  
 Helwig, S. [2000] *VIBROTEM, Ein Vergleich zu Long-Offset Transient Electromagnetic (LOTEM) in Theorie und Praxis*. PhD. thesis, University of Cologne, ISSN 0069-5882.  
 Kaufman, A.A. and Keller, G.V. [1983] *Frequency and transient soundings*. Elsevier, Amsterdam.  
 MacGregor, L., Andreis, D., Tomlinson, J., and Barker, N. [2006] Controlled-source electromagnetic imaging on the Nuggets-1 reservoir. *The Leading Edge*, 25, 984-992.  
 Schwalenberg, K., Willoughby, E., Mir, R., and Edwards, R.N. [2005] Marine gas hydrate electromagnetic signatures in Cascadia and their correlation with seismic blank zones. *First Break*, 23, 57-63.  
 Smit, D.J., Saleh, S., Costello, M., Voon, J., and Moser, J. [2006] Shell's controlled source EM results show positive impact. *68<sup>th</sup> EAGE Conference and Exhibition, Vienna*, Extended Abstracts, A010.  
 Srnka, L.J., Carazzone, J.J., and Ephron, M.S. [2006] Remote reservoir resistivity mapping. *The Leading Edge*, 25, 972-975.  
 Strack, K.-M. [1992] *Exploration with deep transient electromagnetics*. Elsevier, Amsterdam.  
 Weir, G. [1980] Transient electromagnetic fields about an infinitesimally long grounded horizontal electric dipole on the surface of a uniform half-space. *Geophys.J. Roy. Astr. Soc.*, 61, 41-56.  
 Wilson, A.J.S. [1997] *The equivalent wavefield concept in multichannel transient electromagnetic surveying*. PhD thesis, The University of Edinburgh.  
 Wright, D.A., [2003] *Detection of hydrocarbons and their movement in a reservoir using time-lapse Multi-Transient ElectroMagnetic (MTEM) data*. Ph.D. thesis, The University of Edinburgh.  
 Wright, D., Ziolkowski, A., and Hobbs, B. [2002] Hydrocarbon detection and monitoring with a multichannel transient electromagnetic (MTEM) survey, 2002. *The Leading Edge*, 21, 852-864.  
 Wright, D., Ziolkowski, A., and Hall, G. [2006] Improving Signal-to-Noise Ratio Using Pseudo Random Binary Sequences in Multi Transient Electromagnetic (MTEM) Data. *68<sup>th</sup> EAGE Conference and Exhibition, Vienna*. Expanded Abstracts, P065.  
 Zierler, N. [1959] Linear recurring sequences. *J. Soc. Indust. Appl. Math.* 7, 31-48.  
 Ziolkowski, A., Hall, G., Wright, D., Carson, R., Peppe, O., Tooth, D., Mackay, J., and Chorley, P. [2006] Shallow marine test of MTEM method. *76<sup>th</sup> SEG Annual International Meeting*. Expanded Abstracts, 729-734.  
 Ziolkowski, A., Hobbs, B.A., and Wright, D. [2007] Multi-transient electromagnetic demonstration survey in France. *Geophysics* (in press).

