

**Картирование соли в Мексиканском заливе с применением морского магнитотеллурического метода. Salt mapping in the Gulf of Mexico using marine magnetotellurics**

Stewart K. Sandberg, Xianghong Wu и Thomas Roper из WesternGeco Electromagnetics показывают эффективность введения в комплекс съемки метода морской магнитотеллурической разведки (ММТ) с целью формирования изображения в сложной геологической ситуации, такой как подсолевая поверхность в Мексиканском заливе.

Вместе с прогрессом в геофизической технологии развивается современная разведка углеводородов в Мексиканском заливе. Соль имеет сложные опознавательные признаки, обусловленные более высокой скоростью в ней, чем в окружающих осадочных отложениях, ее внешней и внутренней структурой и геометрией, являющимися результатом истории образования ее в осадочном разрезе. В последнее время разработаны улучшенные алгоритмы построения изображения и моделирования и применены к данным традиционных сейсмических и новых акустических методов, таких как широко- и многоазимутальный метод, наряду с недавно развернутым полноазимутальным методом подстреливания по спирали (coil shooting) от WesternGeco.

Разнообразные геофизические методы все в большем объеме применяются для разрешения трудностей построения изображения в сложных условиях изменчивости сейсмических скоростей. Традиционное вертикальное ускорение силы тяжести и полнотензорная гравиметрия (FTG), магниторазведка и/или электромагнитные методы в настоящее время используются наряду с сейсмическими данными для решения разведочно-поисковых задач по подсолевым отложениям. WesternGeco имеет постоянно улучшаемую программу, которая объединяет сейсмический метод, FTG и морскую магнитотеллурическую разведку (ММТ), чтобы усовершенствовать картирование солевого тела и уменьшить неопределенность в проектах разведки подсолевых отложений. Этот подход называется построение изображения, ограниченного многими параметрами, или ММСИ. В этой статье мы рассматриваем ММТ компоненту и иллюстрируем ее применение, показывая результаты проекта в Мексиканском заливе.

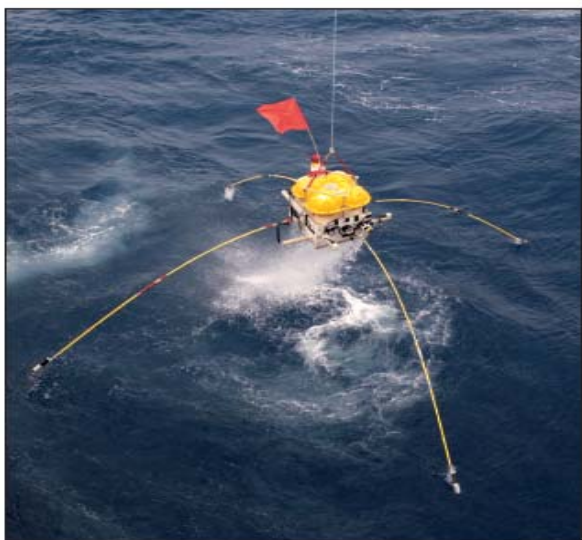


Рис. 1 Извлечение донных приемников

**Метод ММТ**

Магнитотеллурический (МТ) метод является первоначальным электромагнитным методом, который опирается на естественные изменения магнитного поля Земли, которое генерирует электрические токи (или теллурические токи), проходящие через землю. Фактически, он является методом естественного источника, которым нам надо только измерить отклик от этого источника в качестве вторичного электрического или магнитного полей, созданных индуцированными токами в геологической среде. Эти измерения образуют полевые данные, которые затем редуцируются и моделируются, чтобы получить изображение распределения удельного сопротивления в геологической среде.

Метод ММТ относится к МТ съемке, в которой приемники расположены на морском дне. Морская вода ослабляет высокочастотную информацию, и ток течет не только под приемником, а также и над ним в морской воде. Другие, кроме логистики сбора данных, два главных различия между методом ММТ и традиционным методом МТ заключаются в частотном спектре данных и электрическом токе над приемником в воде.

**Исследование в Мексиканском заливе**

Солевые тела в Мексиканском заливе в основном имеют более высокие сейсмические скорости и более высокое удельное сопротивление, чем вмещающие осадочные отложения. Более высокая скорость может преломлять сейсмические лучи и ослаблять энергию, распространяющуюся в осадках, расположенных ниже. Однако, более высокое удельное сопротивление соли изменяет направление теллурических токов, давая возможность методу ММТ обнаруживать и картировать соль. В 2006 г. совокупность 171 приемника ММТ была сформирована в сеть над сложным солевым телом, создавшую самую большую съемку ММТ, проведенную в мире на это время. Рис. 2 показывает размещение этих приемников на батиметрической карте района. Как можно видеть, местоположения приемников были распределены вдоль пяти меридиональных линий и одной широтной линии с совпадающими положениями приемников в центральной части сети. Во время осуществления этого проекта появилась информация по недавно пробуренной скважине, которая дала истинное положение подошвы соли.

## Технологии увеличения производительности

## Моделирование ММТ: 2D против 3D

Была создана сеть полученных данных для последующего двухмерного моделирования ММТ и инверсии. Представляющее интерес простирание гребня солевого тела является широтным, как показано западным трендом батиметрических контуров в средней части сети (рис. 2с). Hoversten et al. (1998) показали, что двухмерное моделирование точно отобразило основание соли по значениям данных метода ТМ (компоненты электрического поля перпендикулярны простиранию тела, которое в этом случае представлено компонентами, ориентированными на север), при тех же конфигурациях, что и данная съемка. Пользуясь этим методом на рис. 3 приведены двухмерная сглаженная инверсионная модель и интерпретированное основание соли. Как можно заметить на рисунке, основание соли было интерпретировано на глубине на 1800 м меньшей, чем

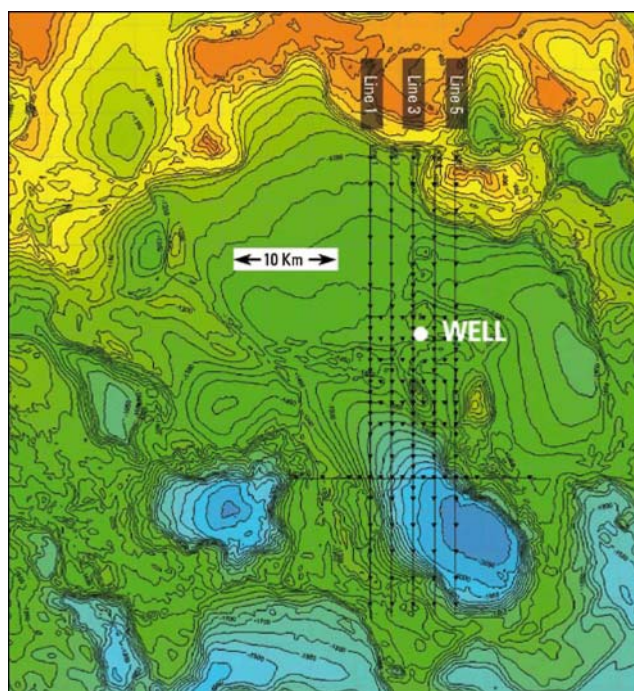


Рис. 2 Положение приемников на батиметрической карте дна моря.

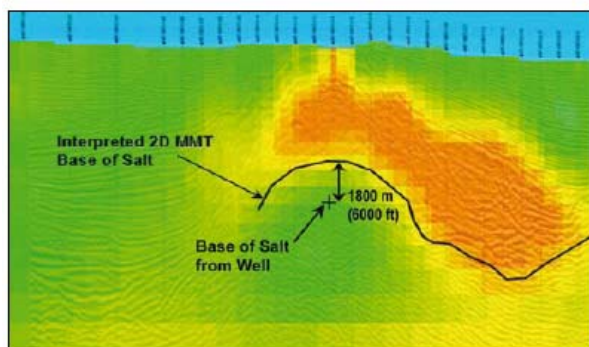


Рис. 3 Результаты двухмерной процедуры сглаживания по профилю 3. Оранжевым цветом представлены высокие значения удельного сопротивления (>5 Ом). Результаты представлены на наложенном в виде фона сейсмическом изображении, север слева.

основание, обнаруженное скважиной.

Повсеместное расхождение малоуглубинного основания соли во многих двухмерных моделях и более глубокого основания, встреченного скважиной, заставило нас перейти от двухмерного к трехмерному моделированию. Распределение соли в исследуемом районе оказалось слишком сложным для двухмерной интерпретации данных ММТ.

На рис. 4 приведен разрез вдоль профиля 3 по сглаженной трехмерной инверсионной модели, которая была рассчитана по этому массиву данных. Изолиния удельного сопротивления в 23 Омм совпадает с основанием соли, которое показано скважинными данными. Однако, в добавление к области с высоким удельным сопротивлением, совпадающей с солевым телом, результатами трехмерного моделирования показаны другие сложные вариации удельного сопротивления. Например, обращает внимание связь между изменением удельного сопротивления (на рисунке распределение показано цветовой раскраской) и отражающей способностью наложенного в виде фона сейсмического разреза (показана толщиной и плотностью линий на сейсмическом изображении). Была проведена предварительная корреляция между зоной низких скоростей по новой сейсмической модели скорости, рассчитанной для этого региона, и областью низких значений удельного сопротивления (голубой цвет) точно слева (к северу) от главного солевого тела на средних глубинах на рисунке.

Следует отметить, что распределение удельного сопротивления, приведенное на рис. 3, является сочетанием поверхностного удельного сопротивления, требуемого для совпадения с ММТ данными приемника, и разрешающей способности метода. Стартовая модель для инверсии была однородным изотропным полупространством под морским дном. Видоизменение этой стартовой модели наблюдаются там, где это требуется для совпадения с данными приемника, или где требует этого алгоритм инверсии (искажения инверсии, например при сглаживании из-за введенных параметров регуляризации), или сочетание этих факторов. Например, если существует глубинное солевое тело, но оно не показано на инверсионной модели, вполне вероятно, что метод ММТ не может в силу своей разрешающей способности выявить это тело. Это может быть для небольших (линейное протяжение относительно глубины захоронения) солевых тел на глубине разреза.



### Совместная интерпретация сейсмки, ММТ и FTG

Большую ценность представляет использование нескольких геофизических методов в совместной интерпретации наряду с существующей геологической и скважинной информацией. Разные геофизические методы различаются либо различными физическими свойствами (например, удельное сопротивление, акустическая скорость, плотность), или различными способами, которыми получен один и тот же физический параметр (например, традиционная сейсмика против сбора широкоазимутальных сейсмических данных). Задача состоит в повышении разрешающей способности, что сможет привести к наилучшему истолкованию рассматриваемых характерных особенностей поисково-разведочной проблемы. Однако, существуют присущие каждому методу сильные и слабые стороны. Совместная интерпретация, которая истолковывает весь массив данных, может сочетать сильные стороны всех методов и давать более обстоятельное изображение геологической среды.

Мы выполнили совместную трехмерную интерпретацию модели, созданной по данным сейсмки, ММТ и FTG на наш район исследования. Рис. 5 приводит результаты этой совместной интерпретации по профилю 3.

Плотностная модель, приведенная на рис. 5, была получена следующим образом: самая современная скоростная модель региона была трансформирована в плотностную, используя взаимосвязь Гарднера (Gardner et al., 1974). В результате последней сейсмической интерпретации были установлены поверхности кровли и подошвы солевых тел. Для солевых тел была принята постоянная плотность  $2160 \text{ кг/м}^3$  ( $2.16 \text{ г/см}^3$  по цветной шкале, приведенной на рисунке). Под солью существует небольшая, до полного отсутствия, информация о скорости, поэтому был задан градиент изменения плотности с глубиной. В самой нижней части модели плотность фундамента предполагалась на основании других исследований в регионе. На

### Технологии увеличения производительности

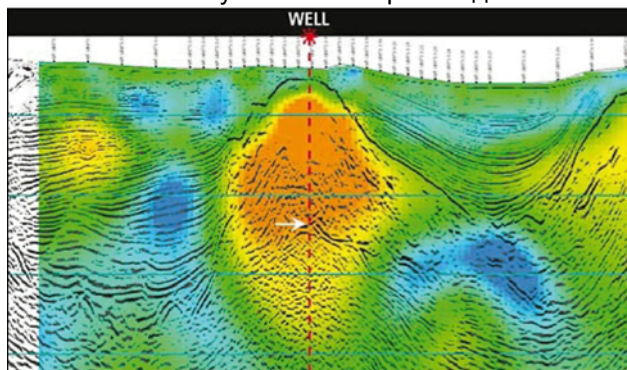


Рис. 4 Результаты моделирования процедуры трехмерного сглаживания по профилю 3. Оранжевым цветом представлены высокие значения удельного сопротивления ( $>23 \text{ Омм}$ ), а голубым – низкие значения удельного сопротивления ( $<0.5 \text{ Омм}$ ). Фоном является широкоазимутальное сейсмическое изображение. Показано положение скважины; стрелка указывает место, где основание соли было околонуено по скважине. Север слева.

фундаменте были также размещены солевые столбы, чтобы согласовать полученную в результате модель с гравитационными данными. Эти столбы могут быть либо (1) реальными солевыми массами немигрированной в окружающую среду части всей соли, либо (2) отражением от места, где плотность разреза прямо над столбом была переоценена, и поэтому скоростная модель была неточной. В действительности, распределение плотности для гравитационного моделирования было трудно независимо получить из-за неточности скоростной модели и отсутствия скважинной информации. Модель ММТ сыграла важную роль в пининге основания соли в середине первоначально главного солевого тела. В ходе работы по проекту стали появляться результаты бурения вместе с усовершенствованной сейсмической моделью по новой широкоазимутальной съемке.

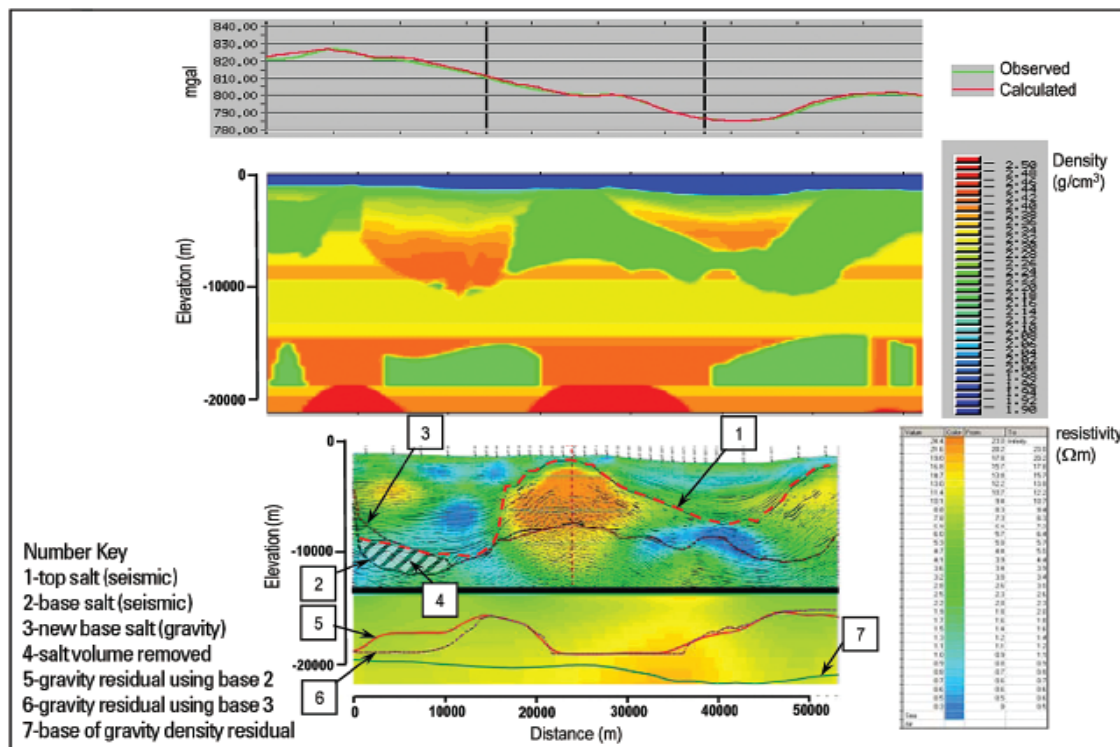


Рис. 5 Совпадение гравитационных данных, плотностная модель, модель ММТ и интерпретируемые поверхности соли и полученные по гравитационному полю остаточные плотностные аномалии.

## Технологии увеличения производительности

В нижней части рис. 5 приведена модель удельного сопротивления (рис. 4) вместе с интерпретируемыми поверхностями соли, различным поведением остаточной плотности и фундаментом, полученными по гравитационному моделированию. Цифра [1] показывает кровлю поверхности соли, полученную по сейсмическим данным. Цифра [2] относится к поверхности основания соли, полученной также по результатам сейсмической интерпретации. Цифра [3] представляет пересмотренную поверхность соли на основании улучшенного совпадения с гравитационными данными. Цифра [4] – масса соли, существенно разная для двух моделей. Поверхности [5] и [6] представляют разностные аномалии плотности (солевые столбы) между двумя моделями по отношению к поверхности фундамента [7].

Как можно видеть по интерпретируемым поверхностям (рис. 5), аномалии остаточной плотности (солевые столбы) сохраняются приблизительно на участках профиля на расстоянии 15 и 45 км вдоль профиля даже после перехода от поверхности [2] к поверхности [3]. Чтобы объяснить это, мы интерпретируем эти остаточные аномалии как погрешности плотностной модели в разрезе, перекрывающем эти аномальные участки. Например, перекрытие остаточной аномалии, находящейся на расстоянии 15 км, представлено областью низких значений удельного сопротивления слева (с севера) от солевого тела. Ранее упоминалось, что последняя скоростная модель показывает низкие значения скорости на этом участке разреза. Последние также указывают на низкие значения плотности, и поэтому такая картина объясняет остаточные аномалии. Остаточная аномалия на расстоянии 45 км вдоль профиля также связана с областью низких значений удельного сопротивления в перекрывающих породах, которые, по предположению, также относятся к области низких значений скорости и плотности.

### Выводы

Мы применили метод ММТ и проиллюстрировали применение его к картированию соли по результатам работ в Мексиканском заливе. Было установлено, что двухмерное моделирование не соответствует требованиям из-за геометрии солевых отложений, и продемонстрированы результаты трехмерного моделирования. Полученное в результате трехмерного моделирования распределение удельного сопротивления не только выявляет солевые тела, но также и дополнительные подробности геологического разреза. Было отмечено, что, как и все другие геофизические методы, метод ММТ имеет пределы разрешающей способности, такие как небольшие тела на большой глубине.

В совместной интерпретации случая, представленного в работе, были использованы разнообразные геофизические методы (сейсмика, ММТ и FTG). Результативная модель считается усовершенствованной моделью, основанной на интерпретации каждого из этих методов.

### Благодарности

Авторы хотели бы выразить свою признательность M. Don Watts и Laura Bornatici (WesternGeco Electromagnetics) за проявленную ими способность проникновения в суть интерпретации ММТ и выполнение трехмерного моделирования. Fred Snyder, David Becker и Normal Biles (WesternGeco) работали над сейсмической интерпретацией в поддержку интеграции ММТ. Chuck Campbell (ACCEL Services) провела гравитационное моделирование и способствовала проведению интерпретации.

### Литература

- Hoversten, G.M., Morrison, H.F. and Constable, S.C. [1998] Marine magnetotellurics for petroleum exploration, Part 2: Numerical analysis of subsalt resolution. *Geophysics*, 63, 826-840.
- Gardner, G.H.E, Gardner, L.W. and Gregory, A.R. [1974] Formation velocity and density — The diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*, 39, 770-780.