

# Входные геоэлектрические модели геологических сред с наличием зоны ГРП

# Распределение уд.сопротивления в зоне ГРП с учетом закона Арчи

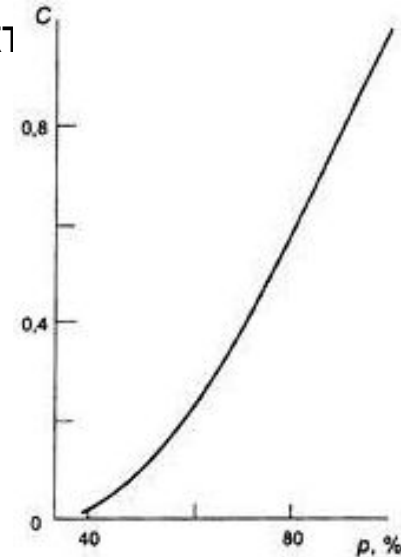
$$\sigma = \frac{2k_n\sigma_\phi}{3}$$

Электропроводность пласта с порами (2-ух фазная среда),  
учитывая электропроводность флюида (гель с пропантом ).

Коэффициент 2/3 означает, что не весь объем флюида участвует в переносе элект

$$\sigma = ck_n\sigma_\phi$$

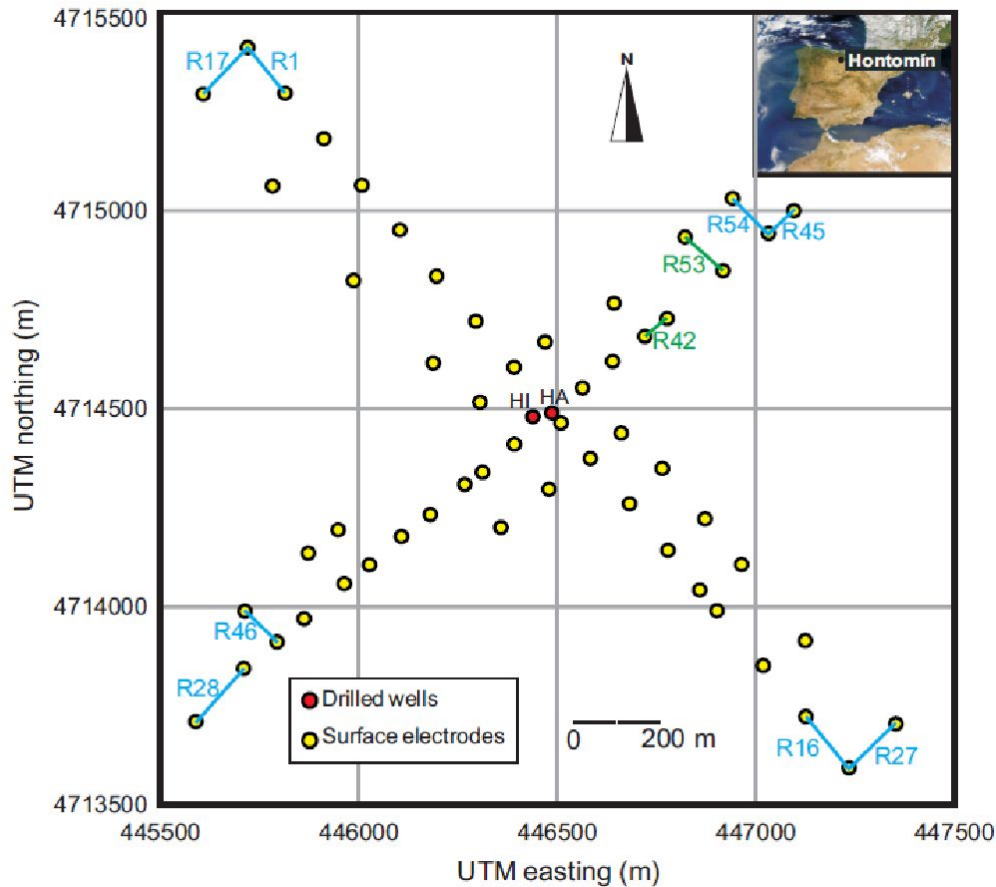
Для моделей с более сложной геометрией трещин.



зависимость относительной электропроводности от доли связанных пор и трещин

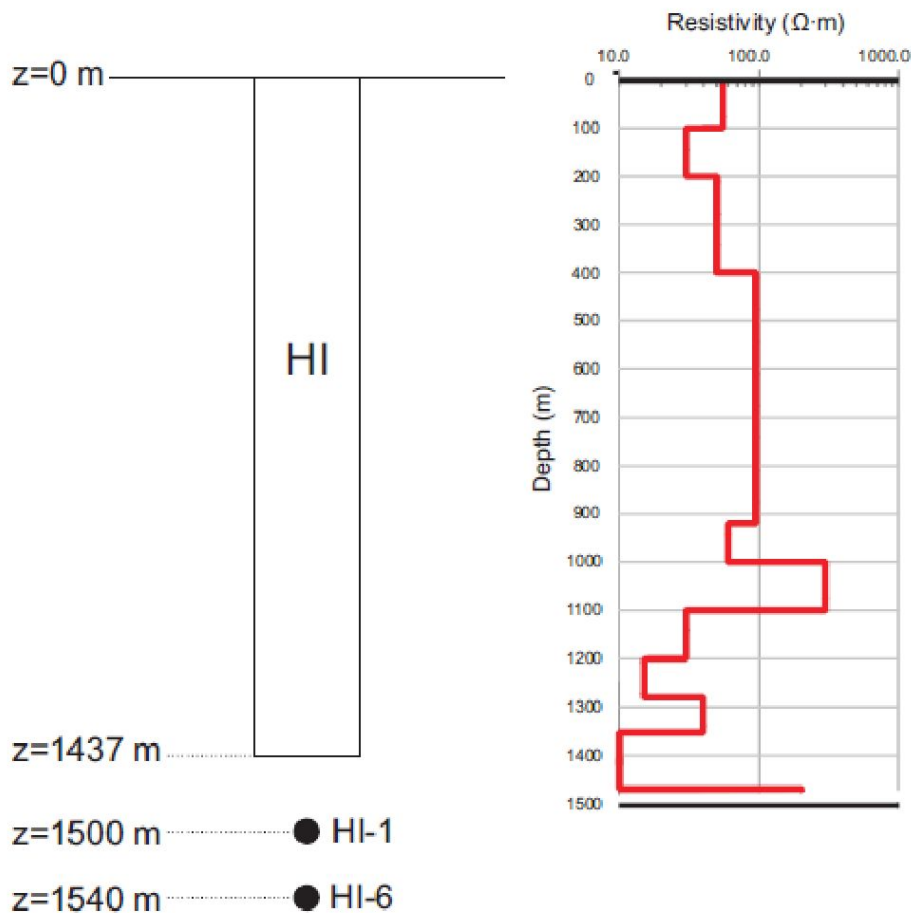
# Методики измерений компонент ЭМ-поля

# Модель измерительной системы при исследовании изменений амплитуды ЭМ-поля, хранилище CO<sub>2</sub> в Хонтомине



- 55 приемных электродов над хранилищем;
- Н1 - нагнетательная скважина;
- НА - контрольная скважина.
- Профиль 1 ориентирован NW-SE;
- Профиль 2 ориентирован NE-SW.
- Длина диполей варьируется от 54 до 188 метров.
- Такая система позволит измерить линейные (ориентированные вдоль каждого профиля) и поперечные (ориентированные перпендикулярно каждому профилю) компоненты электрического поля.

Статья: A land controlled-source electromagnetic experiment using a deep vertical electric dipole: experimental settings, processing, and first data interpretation. Авторы: E. Vilamajó<sup>1\*</sup>, B. Rondeleux<sup>2</sup>, P. Queralt<sup>1</sup>, A. Marcuello<sup>1</sup> and J. Ledo<sup>1</sup>



- Нет контакта между питающими электродами и стальным корпусом

Электромагнитные прямоугольные сигналы, излучаемые источником:

Emission	Date	Fundamental frequency	Emission duration	Average current intensity
1	2014/04/25	0.5 Hz	18 min	1.75 A
2	2014/04/24	4 Hz	112 min	1 A
3	2014/04/24	32 Hz	65 min	1.75 A
4	2014/04/24	128 Hz	61 min	1.75 A

Слева: Схематичное изображение вертикального электрического диполя, установленного на глубине пласта в нагнетательной скважине.

Справа: Стратифицированная модель удельного сопротивления, используемая для моделирования отклика исследуемой структуры (резервуар в Хонтомине).

# Измерения в частотной области

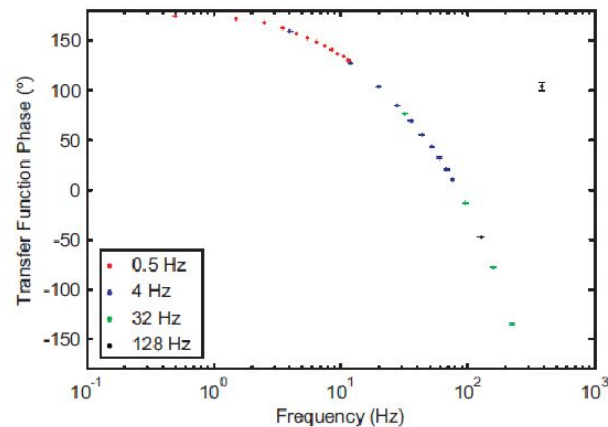
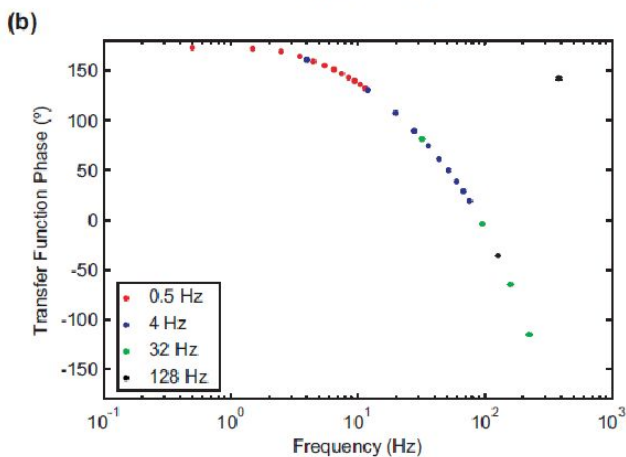
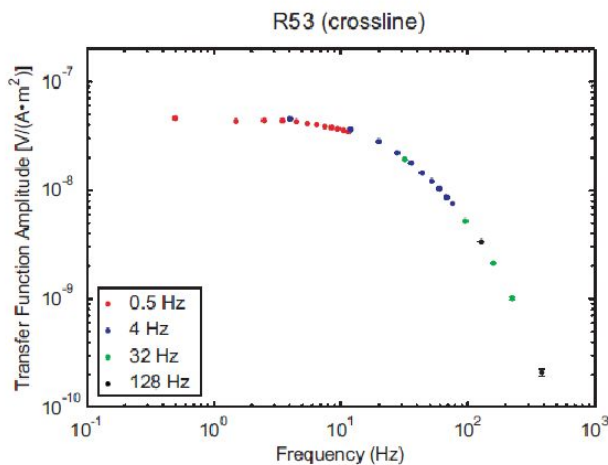
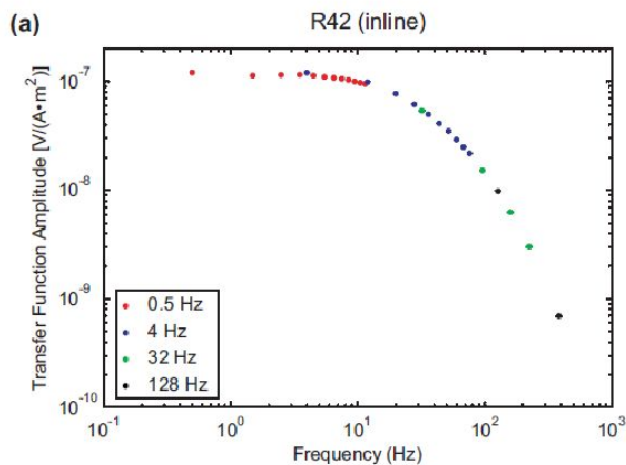
Соотношение между передаваемым сигналом и электрическим полем, измеренным на каждом диполе:

$$E_i(r) = T_{iz}(r)J_z; \quad i\epsilon(\text{продольный, поперечный})$$

- $T$  - передаточная функция между диполем источника и диполем приемника  $[\text{В}/\text{А}\cdot\text{м}^2]$
- $E$  - электрическая компонента ЭМ поля  $[\text{В}/\text{м}]$
- $J$  - момент источника  $[\text{А}\cdot\text{м}]$

! Для каждого местоположения приемника передаточная функция представляет собой комплексное число, которое может быть выражено через амплитуду и фазу.

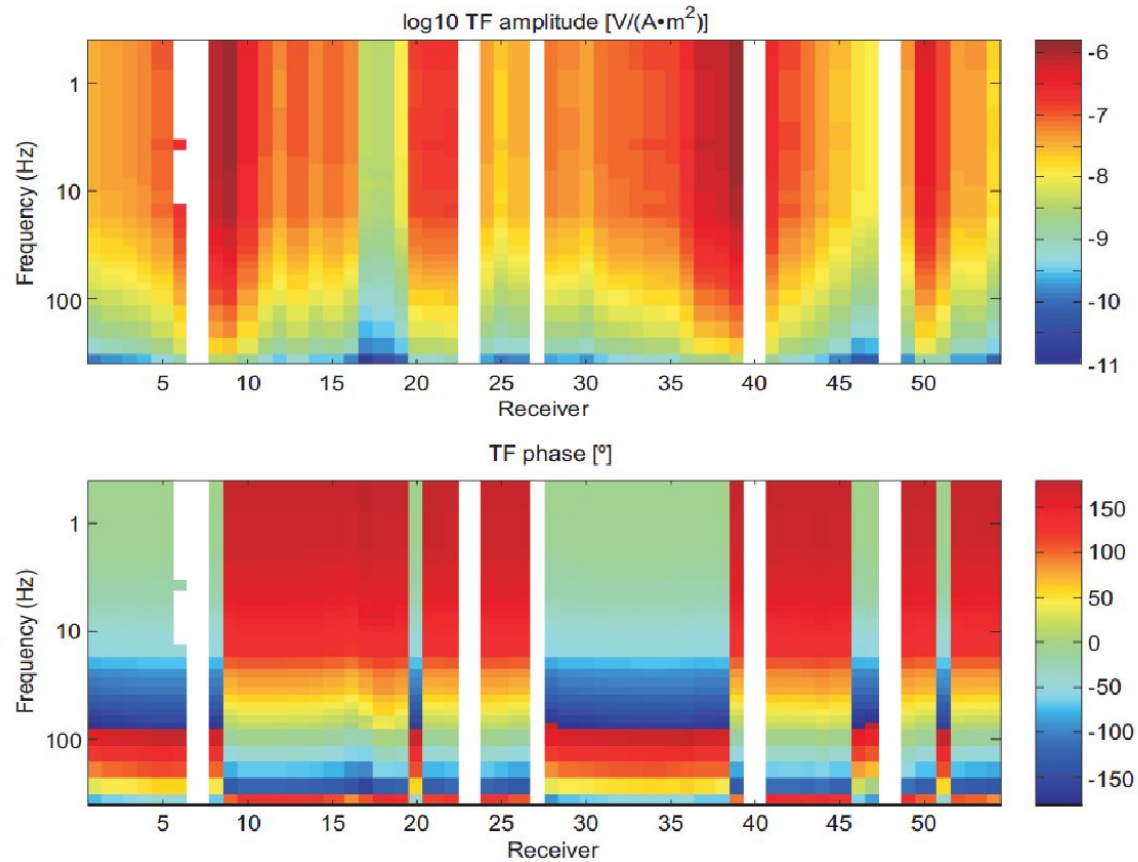
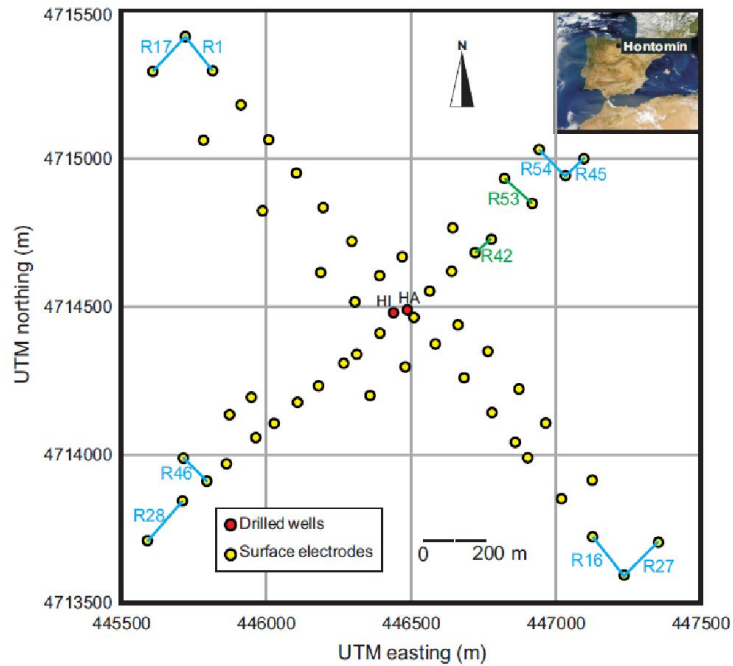
# Амплитуда и фаза передаточной функции для линейно и поперечно-ориентированного приемного диполя



На качественном уровне зависимость передаточной функции на каждом диполе имеет закономерность:

- Почти плоская кривая для низких частот и резкое падение, начинающееся около 10 Гц .
- Амплитуда передаточной функции больше для продольных приемников, чем для перекрестной линии до одного порядка. Этот эффект обусловлен геометрией электрического поля, создаваемого глубоким вертикальным источником.

# Амплитуда (вверху) и фаза (внизу) передаточной функции для всего набора данных





# Вывод

- Большие значения амплитуды передаточной функции получаются в центре каждого профиля и они уменьшаются при увеличении смещения (горизонтальное расстояние между скважиной N1 и центром каждого диполя).
- Наблюдается горизонтальное изменение полярности электрического поля, когда профиль пересекает проекцию источника на поверхность. Этот факт можно объяснить геометрией поверхностного электрического поля, создаваемого глубоким вертикальным источником.

# Влияние стальной обсадной трубы

- Большие значения амплитуды передаточной функции в центре каждого профиля вызваны стальными оболочками скважин НІ и НА.
- Вертикальный электрический диполь, передающий электромагнитный сигнал с частотой 10 Гц и расположенный между 10 и 100 м ниже «подошвы» обсадной колонны, будет вызывать вертикальный ток в трубе.

Для низких частот (ниже 1 Гц) затухающий ток вдоль оболочки с проводимостью  $\sigma_c$ , внутренним радиусом  $r_i$  и внешним радиусом  $r_o$  можно описать следующим образом:

- $$I(z) = I_0 \exp\left(-z \sqrt{\frac{\sigma_f}{S_c}}\right)$$

где  $S_c = \sigma_c \times 2\pi r_i (r_o - r_i)$  - проводимость на единицу длины обсадной колонны,  $I_0$  - ток, индуцированный в обсадной колонне источником, и  $\sigma_f$  - проводимость пласта.

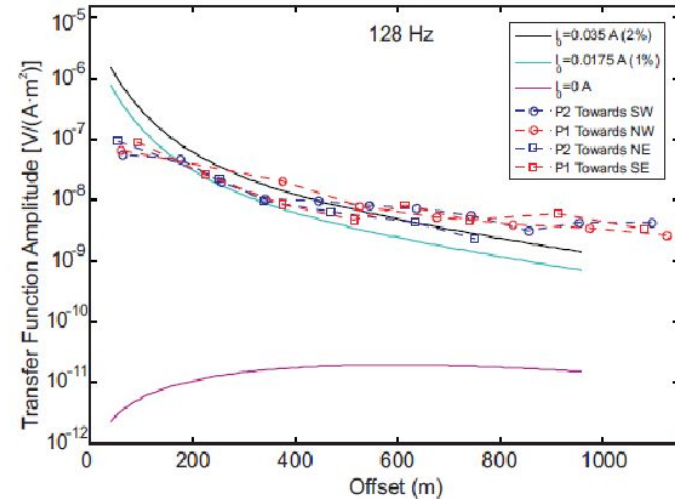
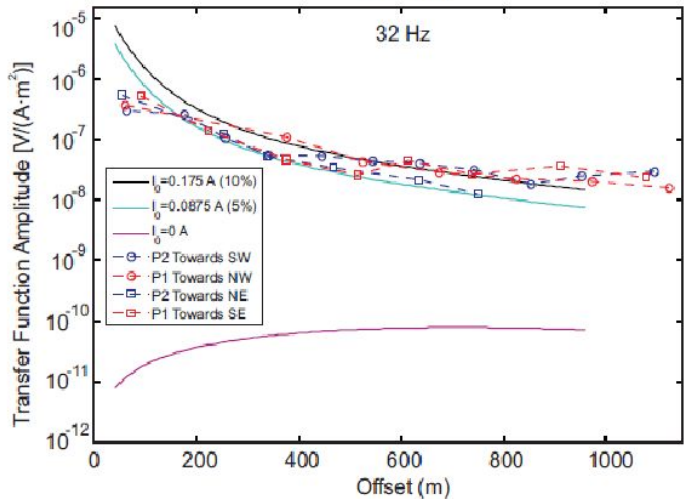
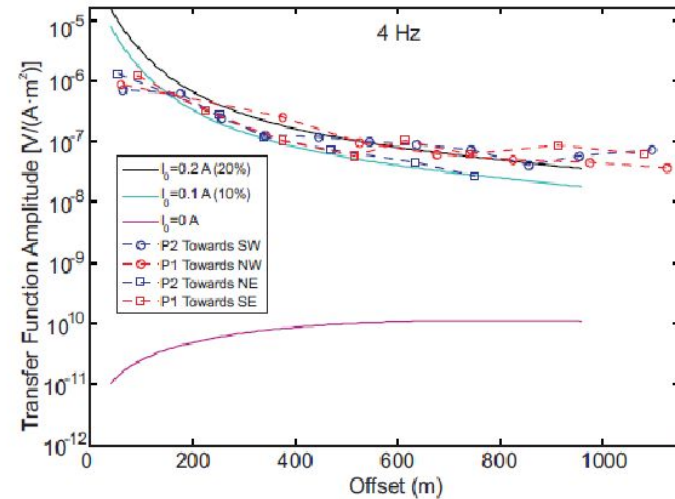
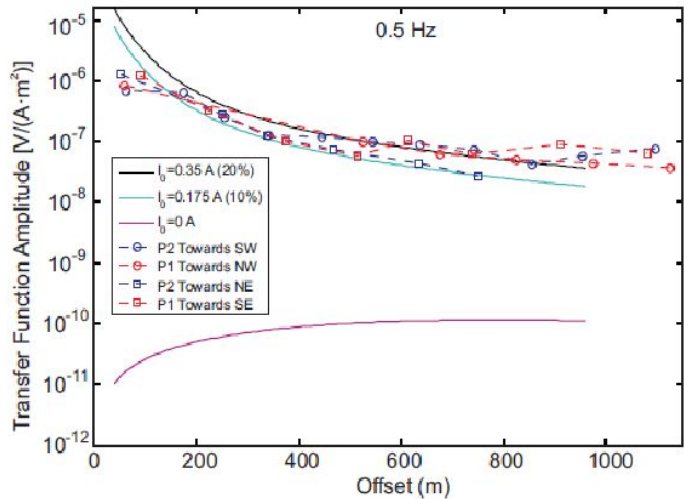
$$I(z) = I_0 \exp\left(-z \sqrt{\frac{\sigma_f}{s_c}}\right)$$

- Данное уравнение выражает затухание силы тока вдоль оболочки, помещенной в однородное пространство с постоянной проводимостью  $\sigma_f$ .
- Распад вызван утечкой тока из обсадной колонны в пласт.
- Для моделирования затухания тока в каждом слое модели удельного сопротивления, данное уравнение справедливо для низких частот.

# Оптимальная электропроводность обсадной трубы

- Для использования оптимального количество тока, которое необходимо индуцировать в корпусе NI, чтобы качественно воспроизвести экспериментальные данные, собранные в эксперименте был выбран диапазон значений от от  $10^6$  См/м до  $10^7$  См/м .
- В данном интервале никаких существенных различий в качестве сигнала получено не было.

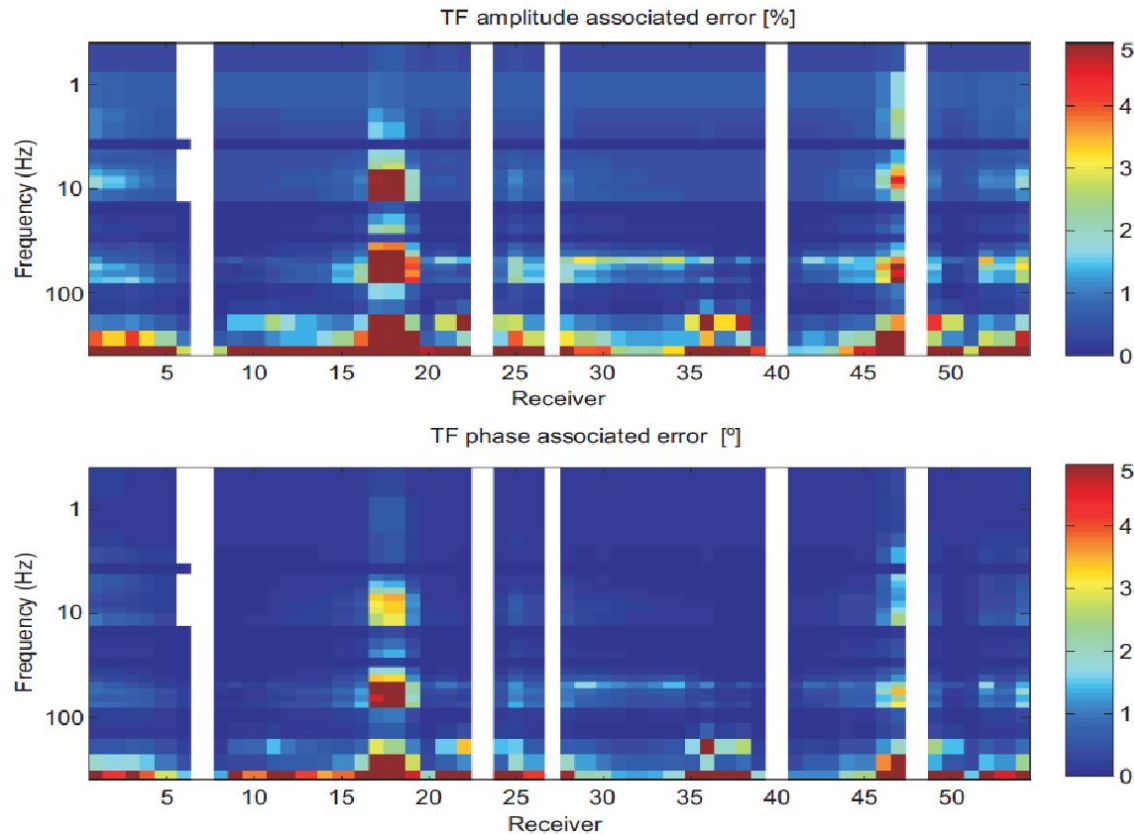
# Зависимость передаточной функции от смещения между приемником и источником



# Выводы

- Точки данных со смещениями короче 100 м не учитываются при моделировании, учитывая большие значения амплитуды моделируемой передаточной функции вблизи нагнетательной скважины.
- Дипольное приближение может быть недостаточным для описания поведения электромагнитного поля вблизи скважины
- Между 150 м и 500 м экспериментальные значения передаточной функции качественно соответствуют модельным данным.
- Для больших смещений экспериментальные данные имеют большую амплитуду, чем модельные данные для трех из четырех полупрофилей.
- Для смещений, превышающих 500 м, экспериментальные данные могут в большей степени зависеть от локальных эффектов, тогда как для смещений от 150 м до 500 м эффект обсадной колонны преобладает над внутренним электрическим полем на поверхности.

# Связанные экспериментальные ошибки с точками амплитуды (вверху) и фазы (внизу)



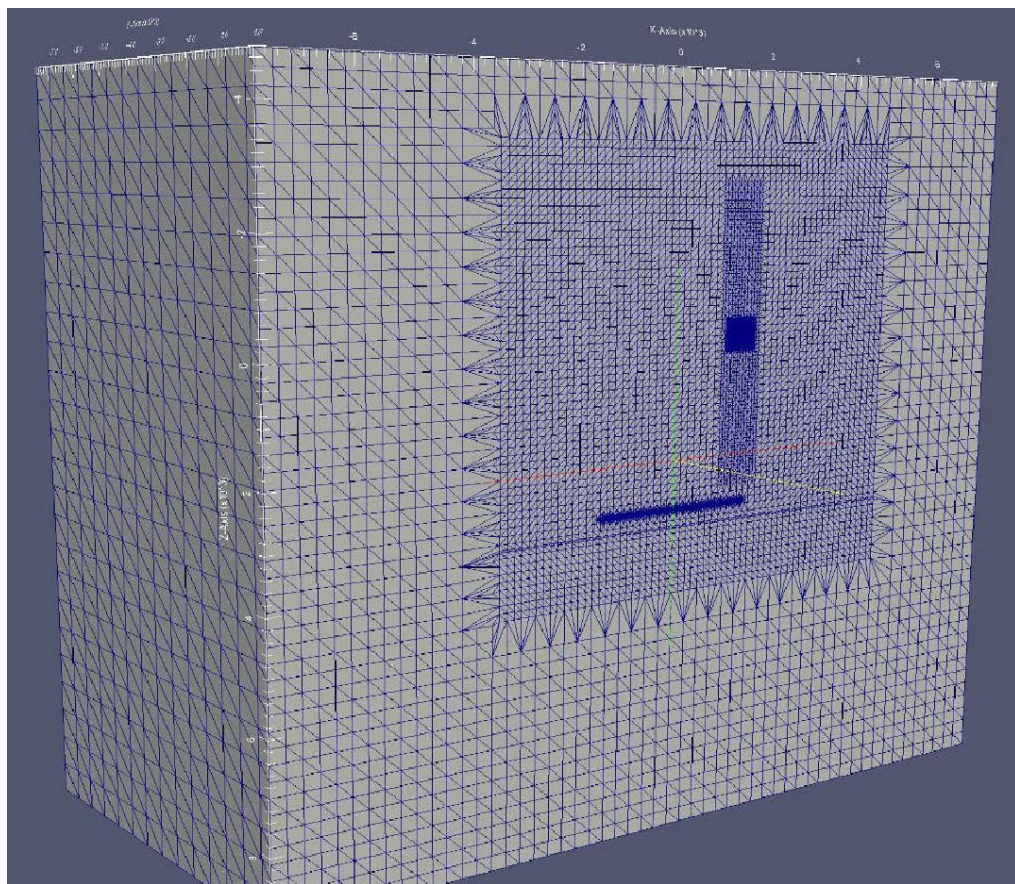
Emission	Segment length	Number of segments	Highest harmonic processed (Hz)	Mean associated error		Gaussian-distributed after KS test (%)
				T amplitude (%)	T phase (°)	
1	18 s	109	11,5 Hz	0.74	0.29	82.12
2	40 s	261	76 Hz	0.82	0.46	86.73
3	58 s	112	224 Hz	1.27	0.66	94.39
4	69.5 s	100	384 Hz	6.70	3.56	83.67



# Выводы

- Частота сигнала с большими связанными ошибками составляет 384 Гц.
- Для такой частоты 65% амплитудных данных и 47% фазовых данных имеют связанную ошибку, превышающую 5% и 5°.
- Связанные ошибки для данных, собранных на приемниках R17, R18, R46 и R47, больше, чем в среднем. Упомянутые приемники представили самые низкие значения амплитуды передаточной функции на предыдущем рисунке.
- Качество данных этих приемников и сигнала с гармоникой 384 Гц может быть улучшено с более длительным по времени излучением источника и приема сигнала.

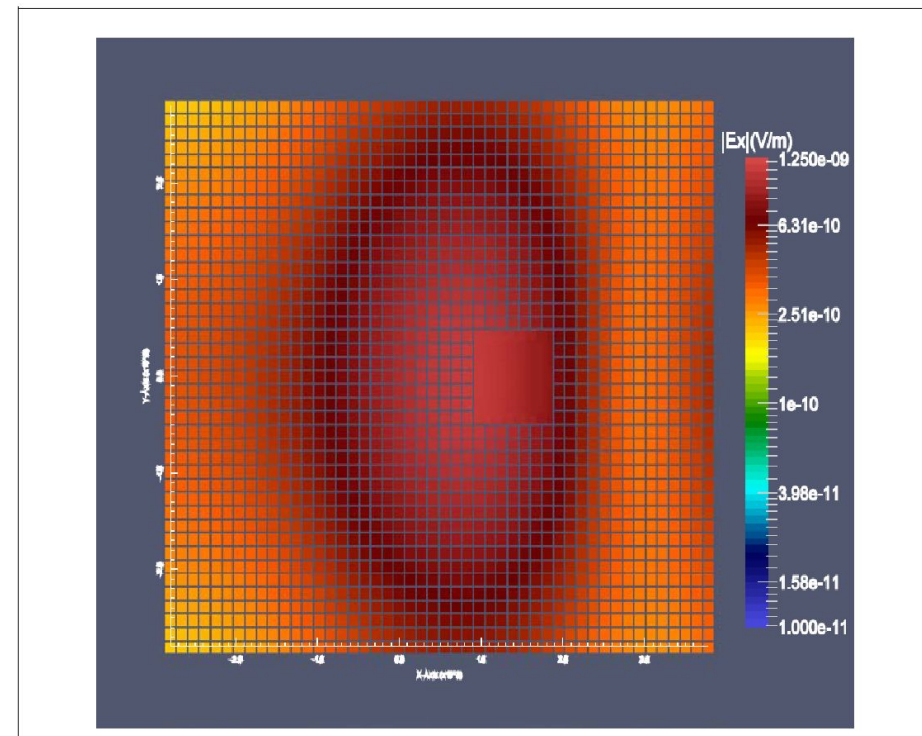
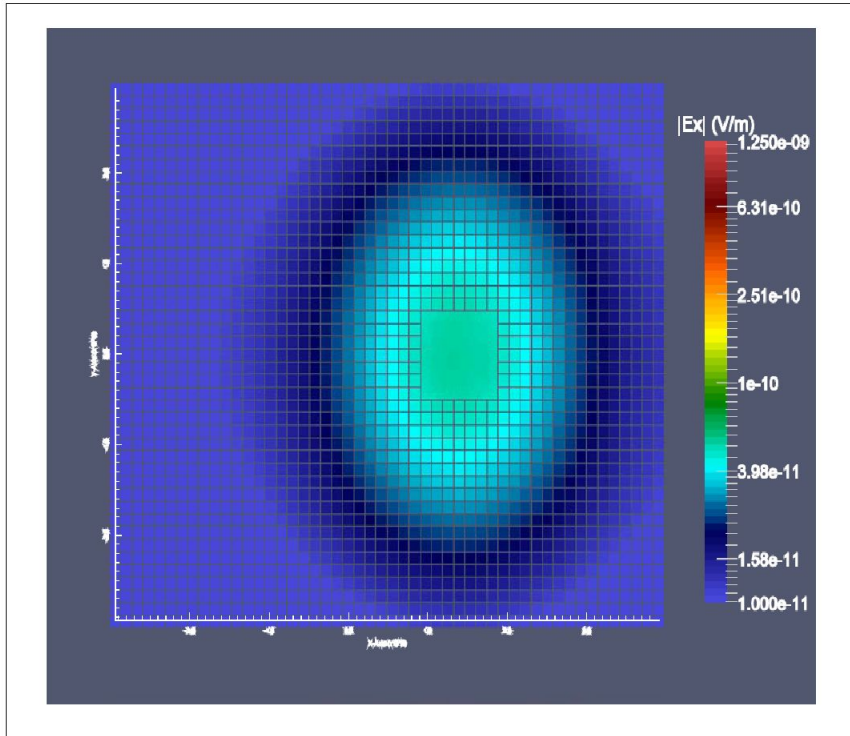
# Мониторинг и визуализация динамики и степени движения жидкости ГРП с использованием наземной электромагнитной системы



- Горизонтальная обсадная труба расположена на глубине  $z = 3150$  м, простираясь от  $x = 0$  м до  $x = 1540$  м.
- На поверхности передатчик центрируется около одного конца корпуса на  $x = 1400$  м и выровнен параллельно ему.
- Расстояние между узлами модели на поверхности вокруг передатчика уточняется до расстояния  $4,375$  м.
- Электропроводность обсадной трубы  $9,2 \times 10^4$  См/м.
- Усреднение по объему требуется, так как радиус трубы меньше размеров элемента сетки.

Статья: *Monitoring and Imaging the Dynamics and Extent of Hydraulic Fracturing Fluid Movement Using Ground-Based Electromagnetics, with Application to the Eagle Ford Shale*. Авторы: Mark S. Hickey\*, Santiago Treviño III, Deep Imaging Technologies Inc.; Mark E. Everett, Texas A&M University

# Амплитуда $E_x$ компоненты на поверхности с наличием (справа) без обсадной трубы (слева)



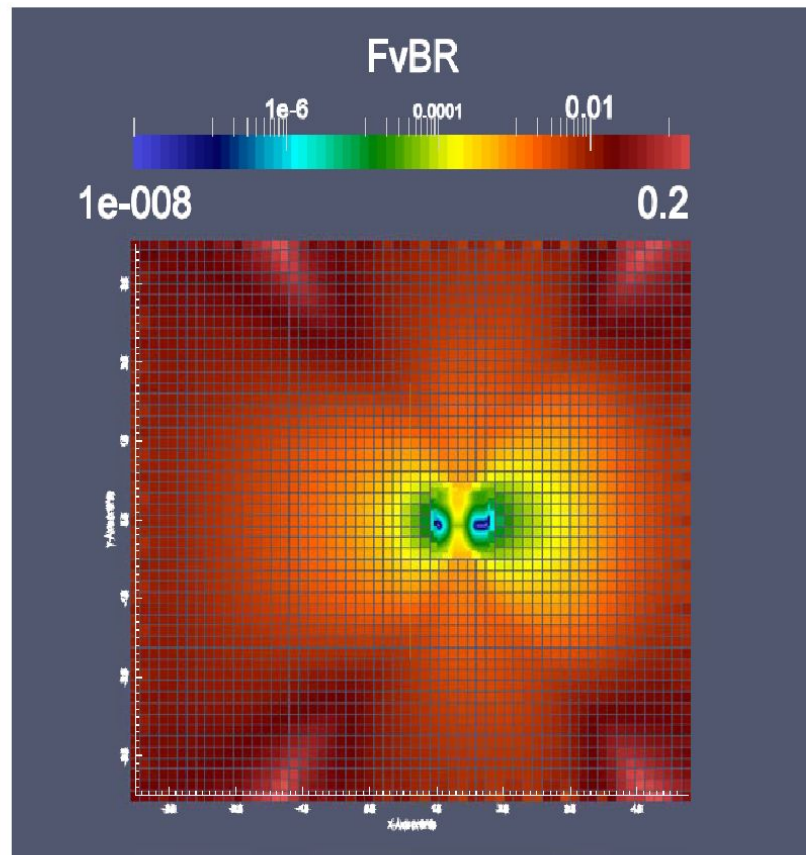
Определяется наибольший отклик с максимальной амплитудой поля  $E_x$  на определенной частоте. Таким образом, используется оптимальная частота передатчика для дальнейших исследований.

На оптимальной частоте видно, что обсадная колонна увеличивает отклик среды с учетом впрыскиваемой жидкости примерно на два порядка.

# Суперпозиция полей

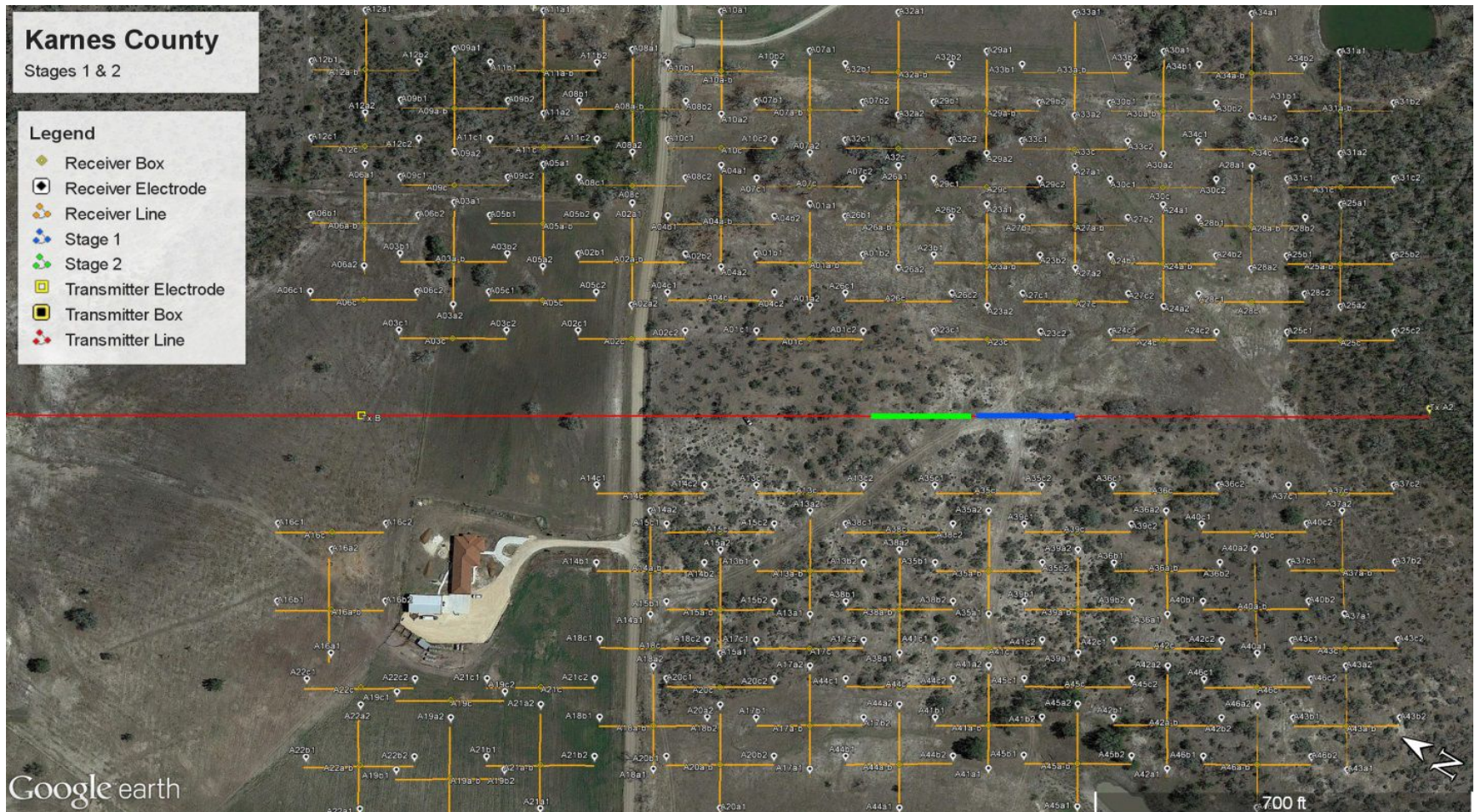
Отклик среды:

$$FvBR = 100\% \cdot \left| \frac{\text{Вторичное поле}}{\text{Первичное поле}} \right|$$



Основное поле - это суммирование поля от передатчика и отклика трубы. В месте расположения приемников рядом с передатчиком FvBR, включая влияние обсадной колонны, имеет порядок от  $10^{-3}$  до  $10^{-4}$ , что указывает на необходимость в приемной системе с -120 дБ отношения сигнал / шум (SNR) и по меньшей мере 120 дБ динамического диапазона.

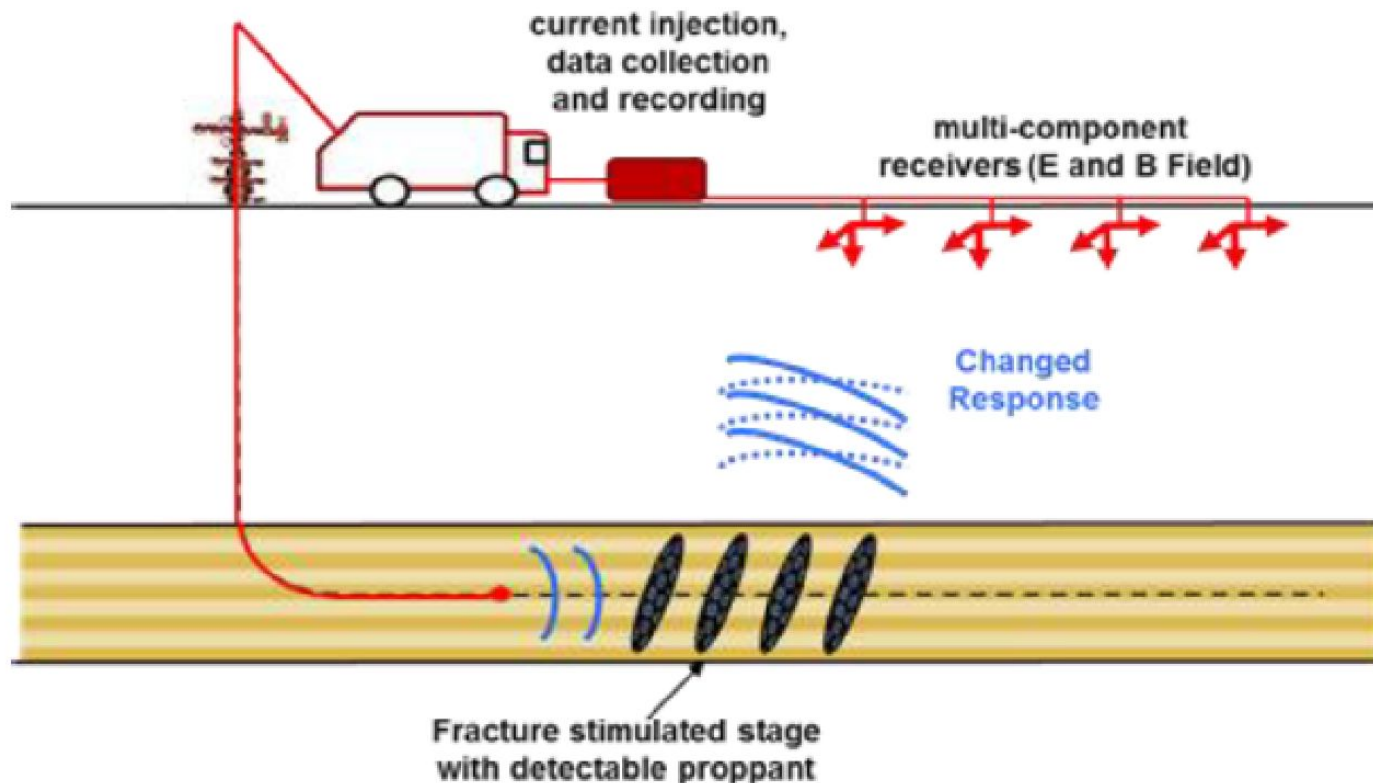
# Расположение передатчика и приемника



# Методика измерений

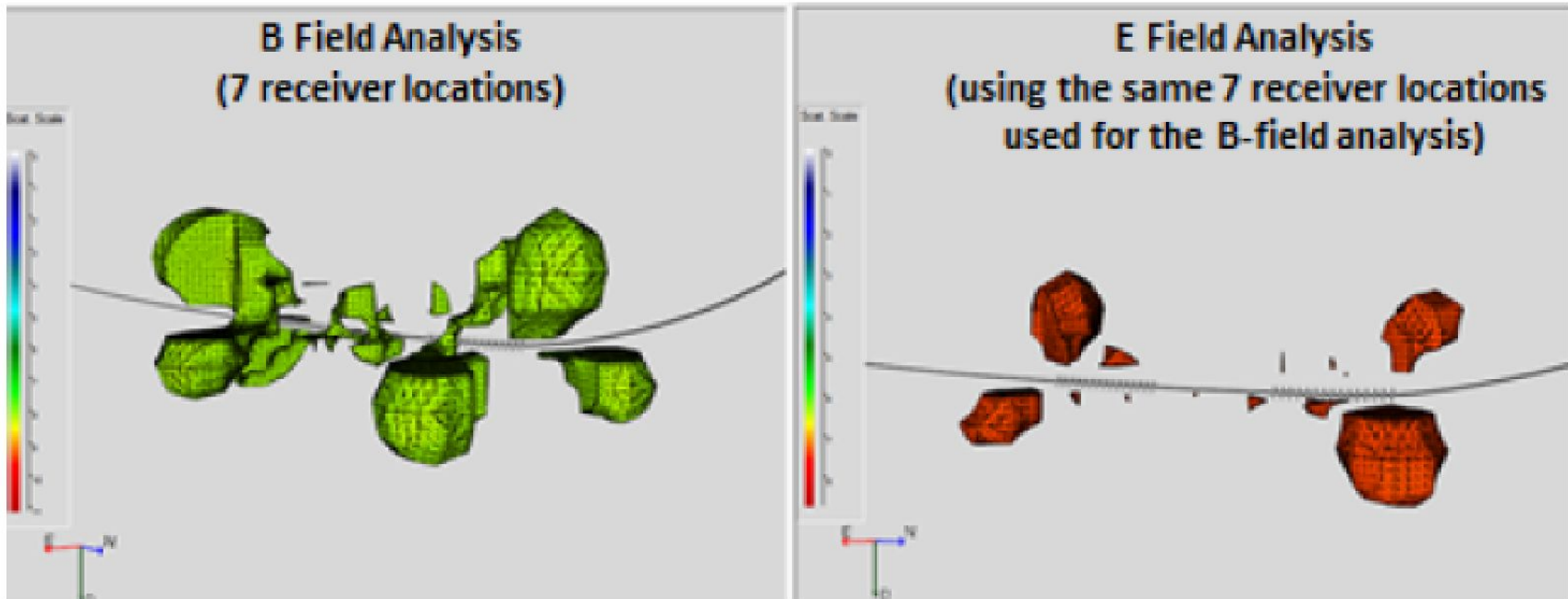
- Ортогональная ориентация RX-диполя предоставляет больше информации о зоне ГРП, но сила сигнала обычно на два порядка ниже, чем у сигналов, использующих продольную ориентацию RX-диполя.
- Большой сигнал продольной ориентации приемного диполя позволяет упростить обработку и сократить время наложения полезного сигнала.
- Смещение приемников от передатчика определяется силой передаваемого сигнала. Если приемники расположены слишком близко, первичный сигнал слишком сильный, насыщает оборудование, и мы не можем извлечь вторичный отклик из недр.
- Чтобы уменьшить краевые эффекты, вызванные диполем передатчика, его длина увеличивается в 6-7 раз.

# ЭМ-мониторинг ГРП с питающей линией в скважине



Статья: [Far-Field Proppant Detection Using Electromagnetic Methods - Latest Field Results](#)  
Авторы: T. Palisch, W. Al-Tailji, L. Bartel, C. Cannan, J. Zhang, CARBO Ceramics; M. Czapski, K. Lynch, ConocoPhillips

# Отклик магнитного поля «вдвое» больше, чем отклик электрического поля



Сравнение местоположения проппанта ЭМ, определенного по семи датчикам магнитного поля (В-поле) (слева) и семи датчикам электрического поля (Е-поле) (справа), расположенным в тех же местах, что и магнитные датчики.

Хотя изображение отличается от изображения, полученного с использованием восемнадцати детекторов (из-за недостаточного количества датчиков), эти два изображения очень похожи друг на друга, причем В-поле обеспечивает значительно больший объем и детализацию резервуара.



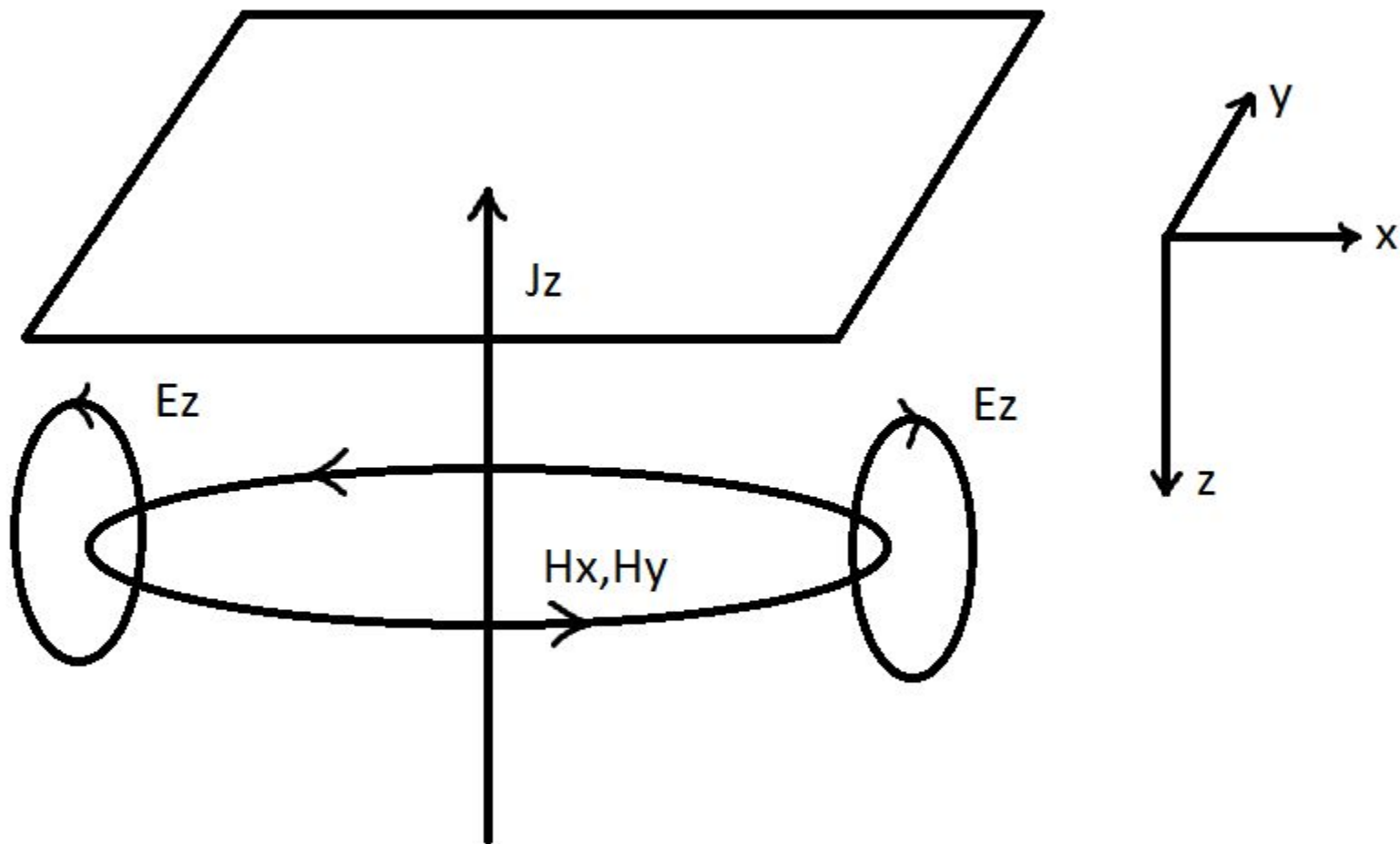
# Применение методики измерений методом ЗСБ для мониторинга ГРП

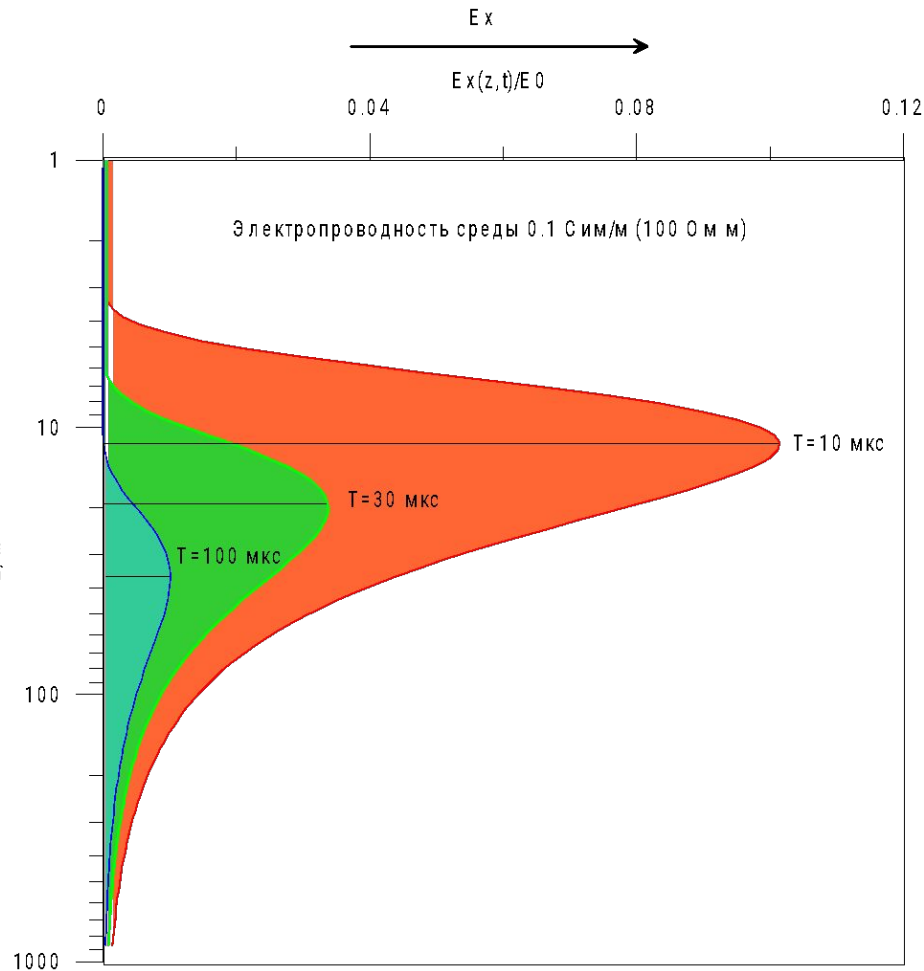
Трансверсально-магнитного (ТМ) поля вертикального электрического диполя

$$E_x, E_y, E_z \neq 0$$

$$H_x, H_y \neq 0$$

$$H_z = 0$$





Рассмотрим выражение в одномерном случае

$$E_z = 0 \text{ и } E_y = 0 \text{ и } \frac{\partial E_x}{\partial x} = \frac{\partial E_x}{\partial y} = const.$$

Тогда

$$\frac{\partial^2 E_x(z, t)}{\partial z^2} = \sigma \cdot \mu \mu_0 \frac{\partial E_x(z, t)}{\partial t}$$

Если решать данную краевую задачу при следующих граничных условиях:

$E_x(z = 0, t = 0) = E_0$ ,  $E_x(z = \infty, t) = 0$  и  $E_x(z, t = \infty) = 0$ ,  
получим

$$E_x(z, t) = \frac{E_0}{z^2 \sigma \mu_0} \left( \frac{z}{\sqrt{\pi u}} \exp\left(-\frac{u^2}{z^2}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{u}{z}\right) \right),$$

где,  $u = \sqrt{\frac{t}{\sigma \mu_0}}$  [м] - определяет положение максимума

напряженности электрического поля или эффективную длину диффузии. Часто  $u$  - называют радиотехническим термином толщина **скин-слоя**.