Входные геоэлектрические модели геологических сред с наличием зоны ГРП

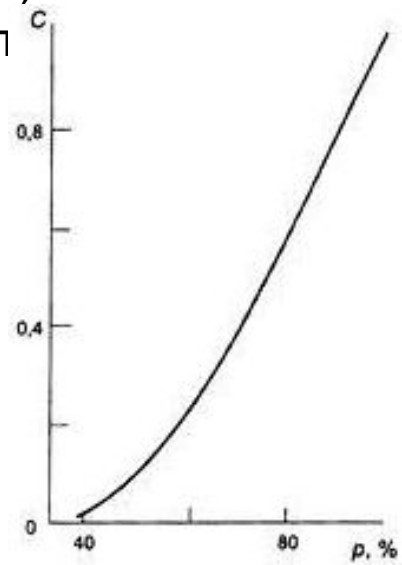
Распределение уд.сопротивления в зоне ГРП с учетом закона Арчи

$$\sigma = {2k_n\sigma_ф}/{3}$$

Электропроводность пласта с порами (2-ух фазная среда),
учитывая электропроводность флюида (гель с проппантом).
Коэффициент 2/3 означает, что не весь объем флюида участвует в переносе элект

$$\sigma = ck_n\sigma_ф$$

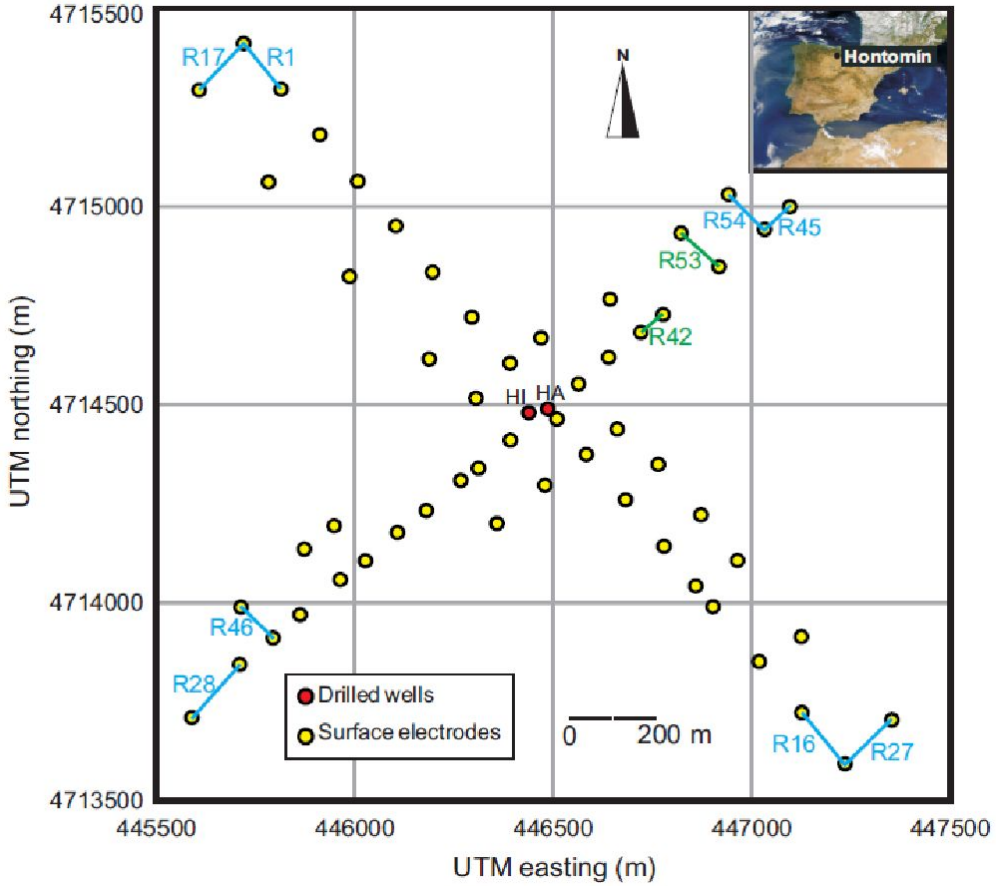
Для моделей с более сложной геометрией трещин.



зависимость относительной электропроводности от доли связанных пор и трещин

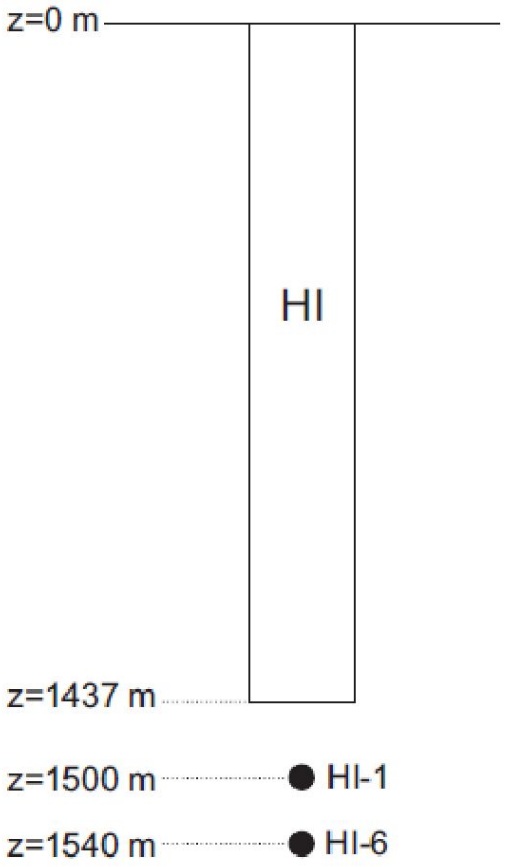
Методики измерений компонент ЭМ-поля

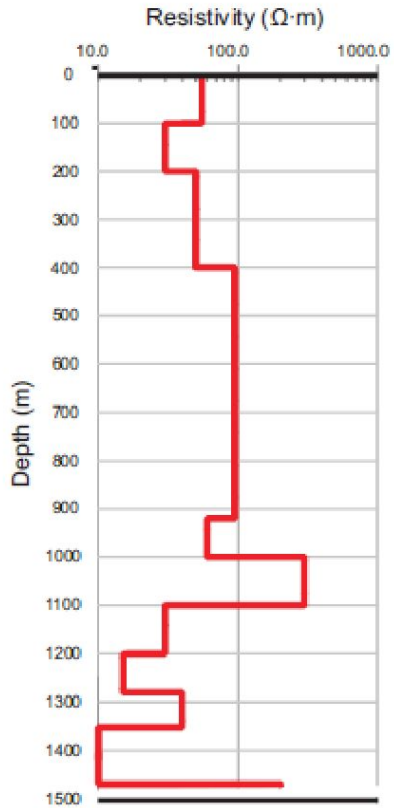
Модель измерительной системы при исследовании изменений амплитуды ЭМ-поля, хранилище CO_2 в Хонтомине



- 55 приемных электрода над хранилищем;
- HI - нагнетательная скважина;
- HA - 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. Vilamaj ´o1∗, B. Rondeleux2, P. Queralt1, A. Marcuello1 and J. Ledo1





- 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

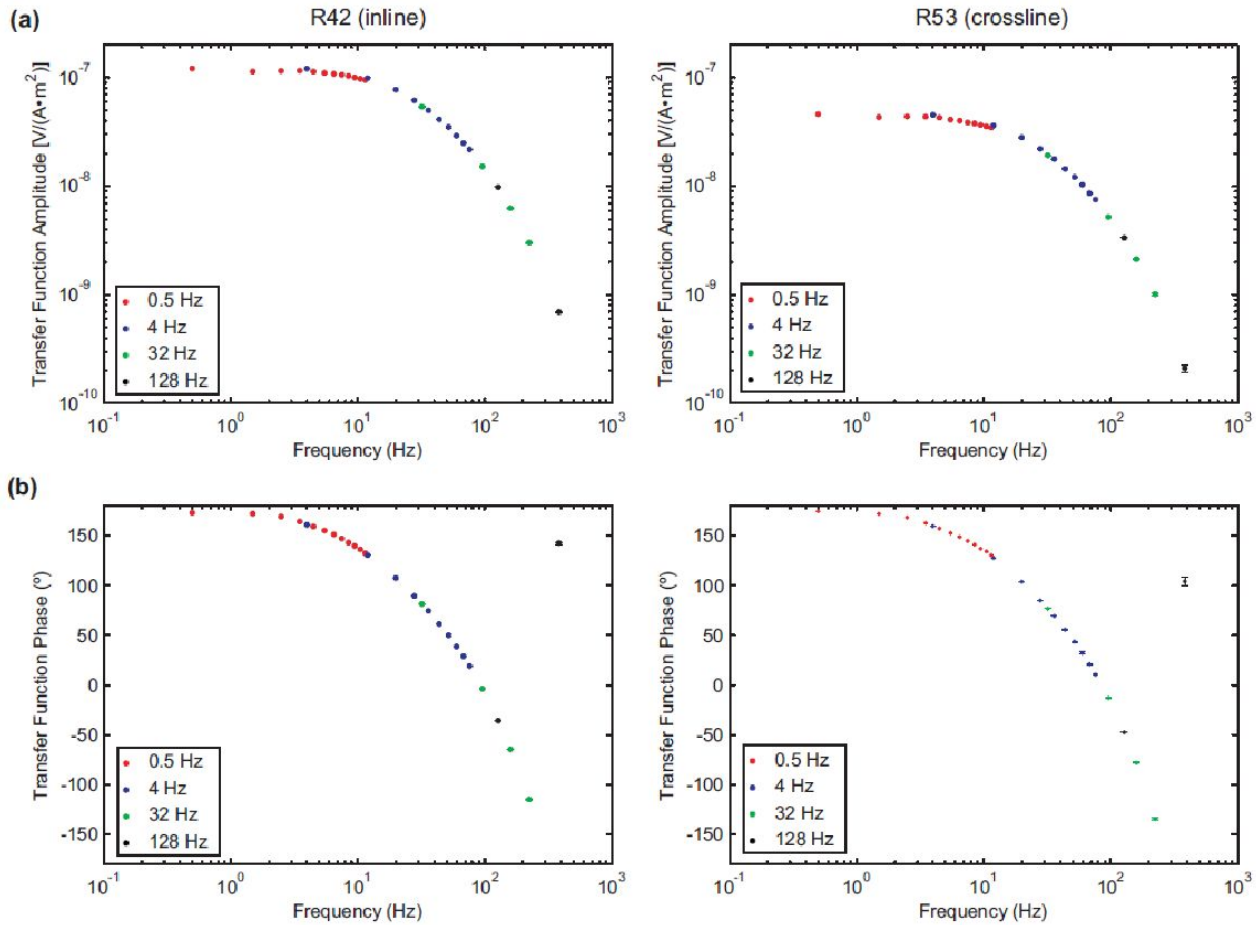
Соотношение между передаваемым сигналом и электрическим полем, измеренным на каждом диполе:

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

- 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.

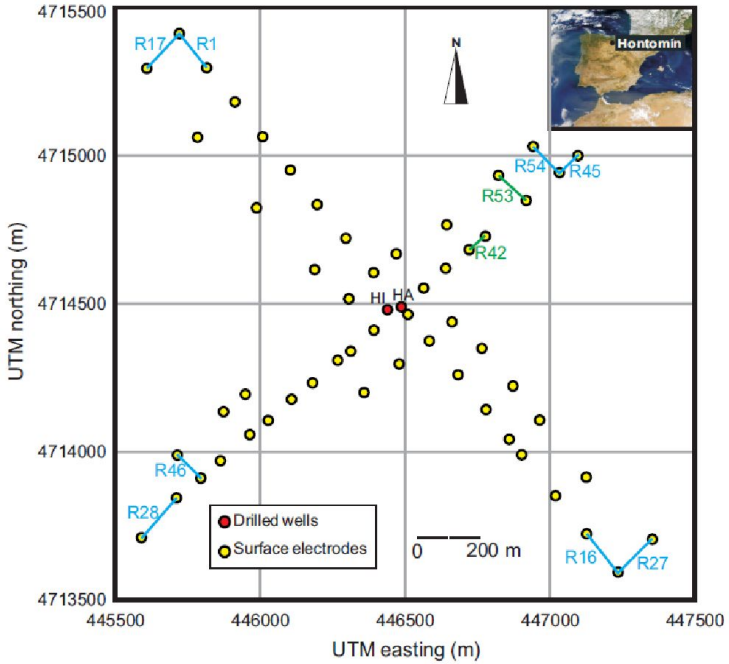
Амплитуда и фаза передаточной функции для линейно и поперечно-ориентированного приемного диполя

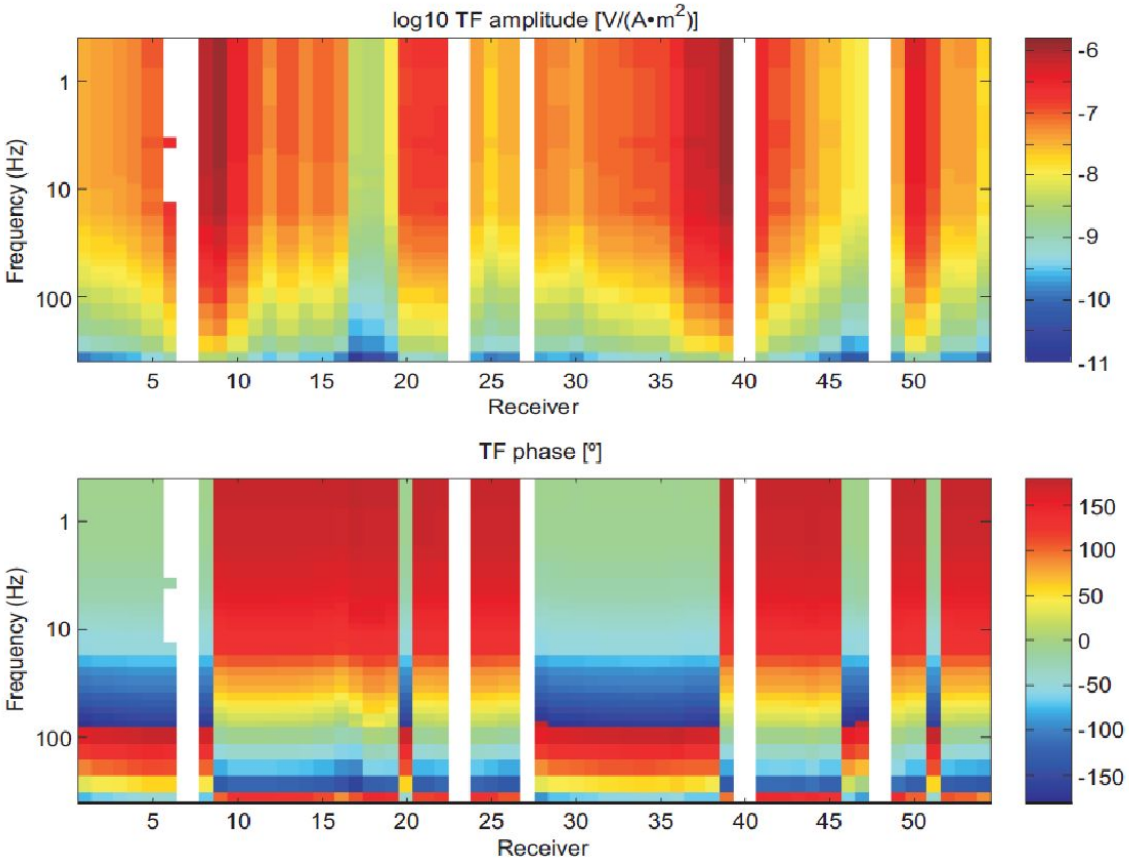


На качественном уровне зависимость передаточной функции на каждом диполе имеет закономерность:

- 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





Выводы

- Большие значения амплитуды передаточной функции получаются в центре каждого профиля и они уменьшаются при увеличении смещения (горизонтальное расстояние между скважиной HI 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 HI и HA.
- 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 σ_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 σ_f - проводимость пласта.

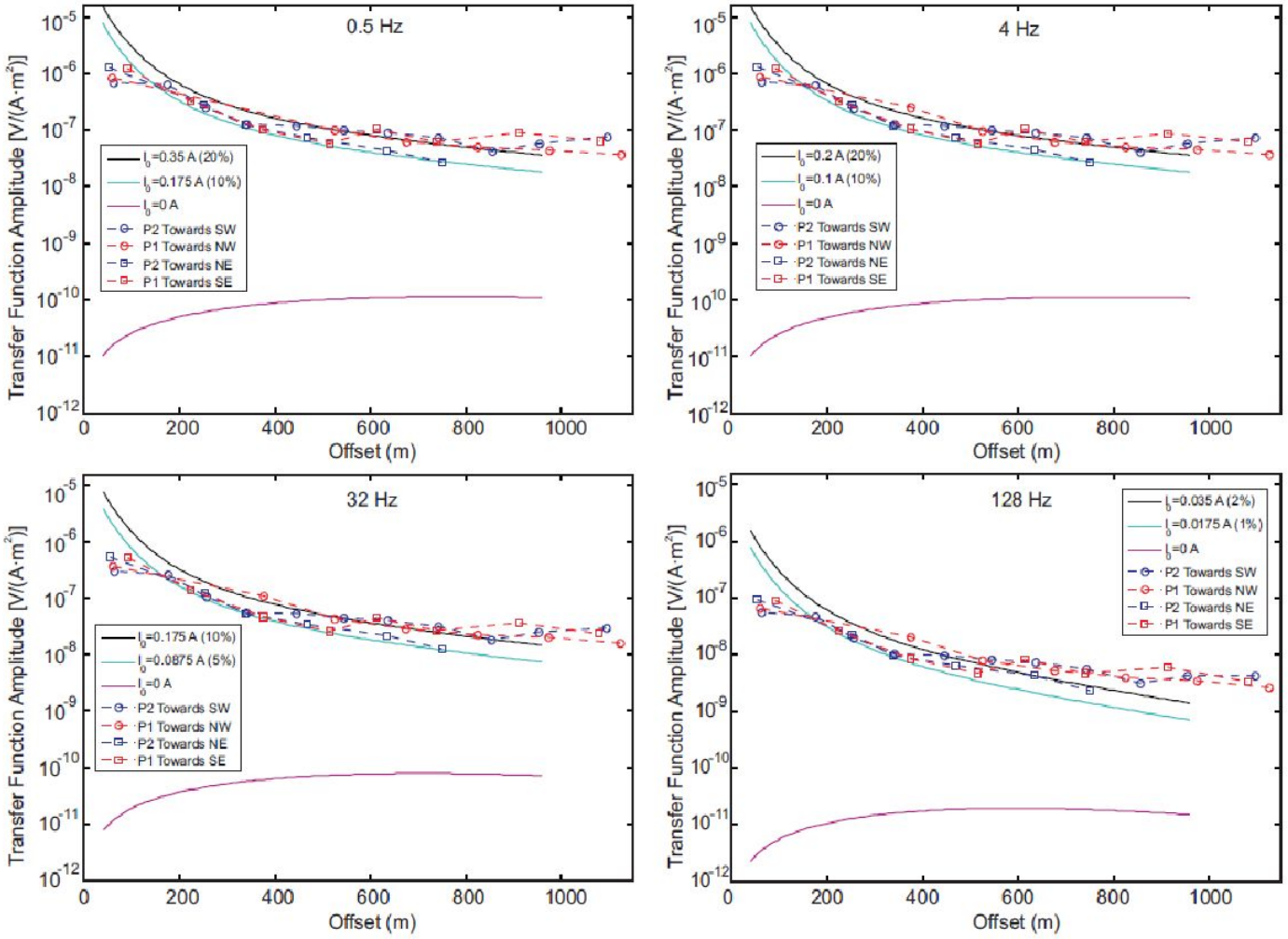
$$I(z) = I_0 \exp(-z\sqrt{\frac{\sigma_f}{S_c}})$$

- Данное уравнение выражает затухание силы тока вдоль оболочки, помещенной в однородное пространство с постоянной проводимостью σ_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 НІ, 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.

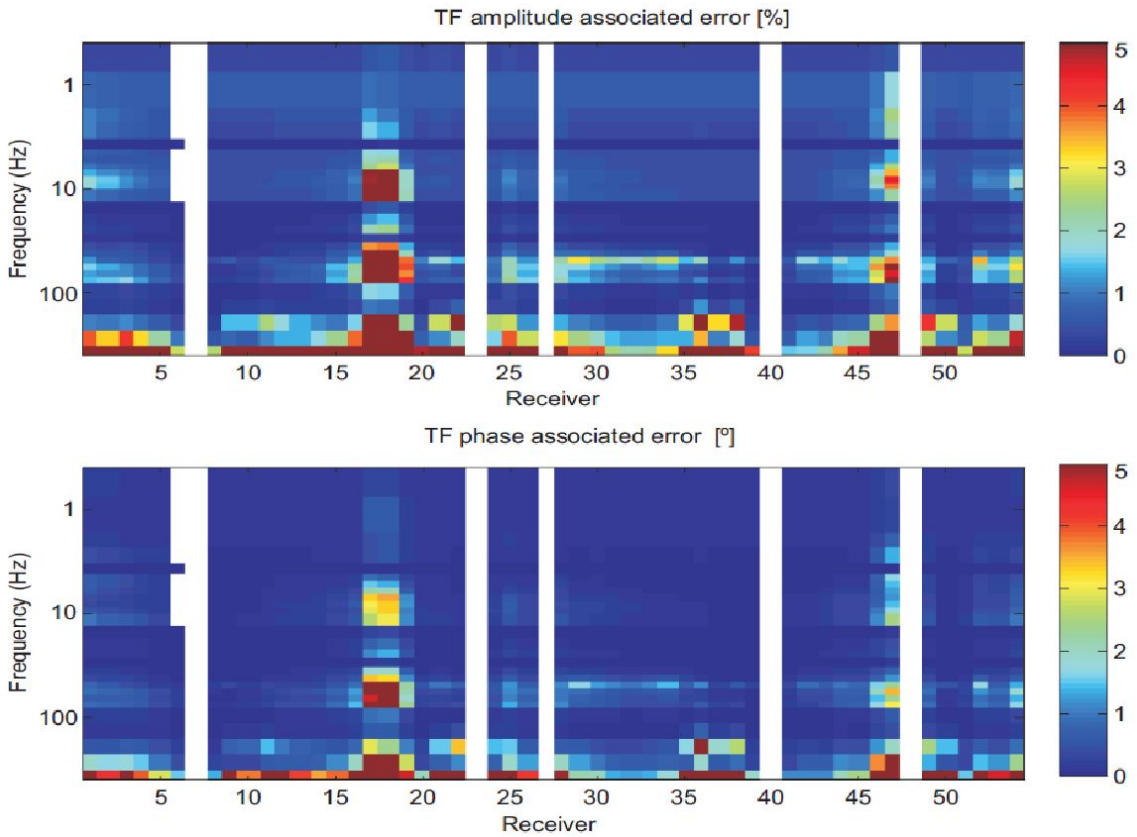
Зависимость передаточной функции от смещения между приемником и источником



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)

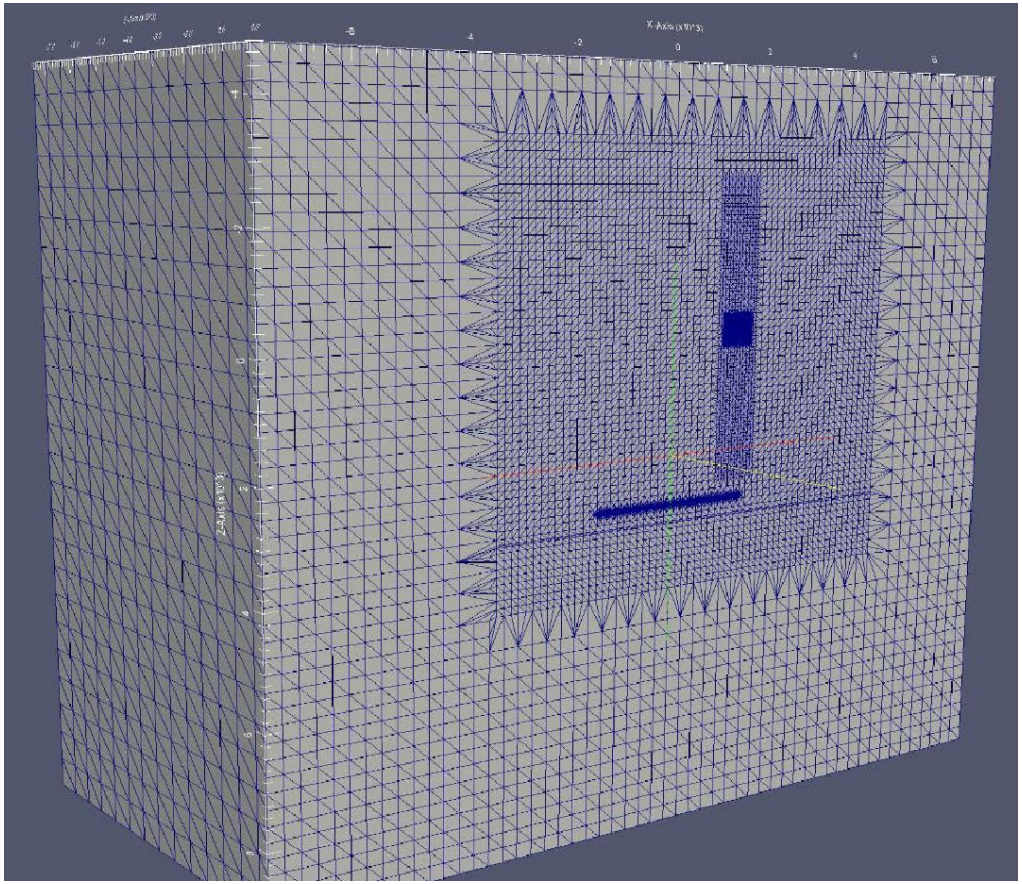


Emission	Segment length	Number of segments	Highest harmonic processed (Hz)	Mean associated error		Gaussian-distributed after KS test (%)
				T amplitude (%)	T phase (º)	
1	18 s	109	11,5 Hz	0.74	0.29	82.12
2	40 s	261	76 Hz	0.82	0.46	86.73
3	58 s	112	224 Hz	1.27	0.66	94.39
4	69.5 s	100	384 Hz	6.70	3.56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

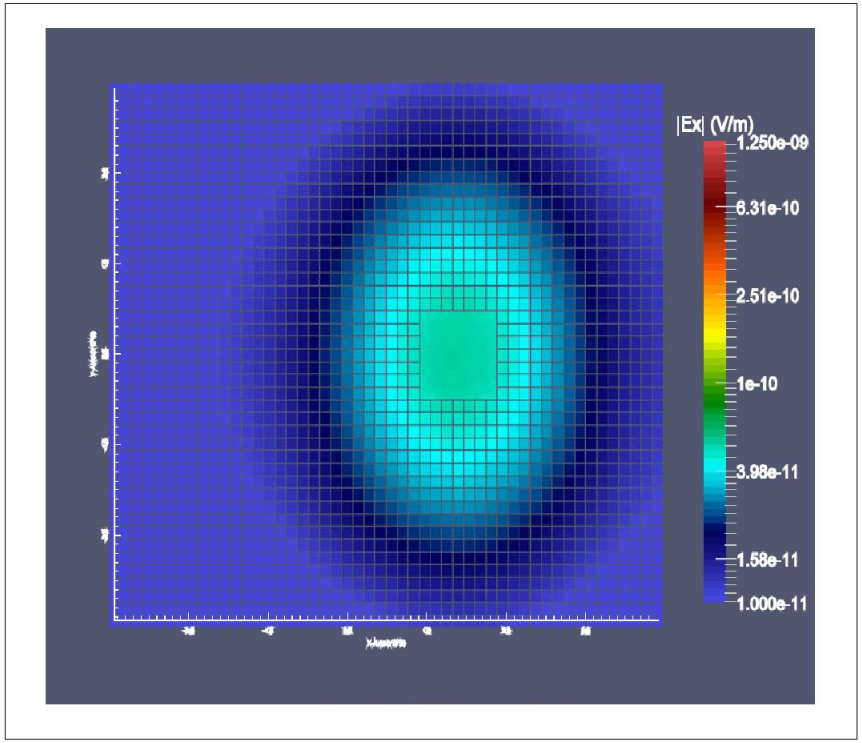
Мониторинг и визуализация динамики и степени движения жидкости ГРП с использованием наземной электромагнитной системы

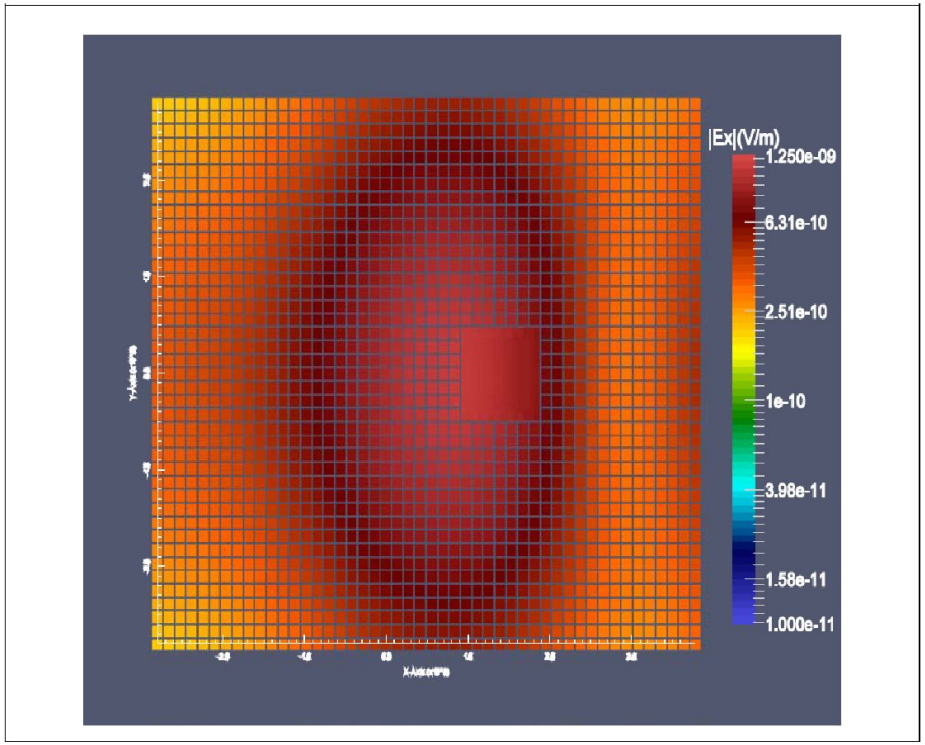


- Горизонтальная обсадная труба расположена на глубине z = 3150 м, простираясь от x = 0 м до x = 1540 м.
- На поверхности передатчик центрируется около одного конца корпуса на x = 1400 м и выровнен параллельно ему.
- Расстояние между узлами модели на поверхности вокруг передатчика уточняется до расстояния 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 Ex компоненты на поверхности с наличием (справа) без обсадной трубы (слева)





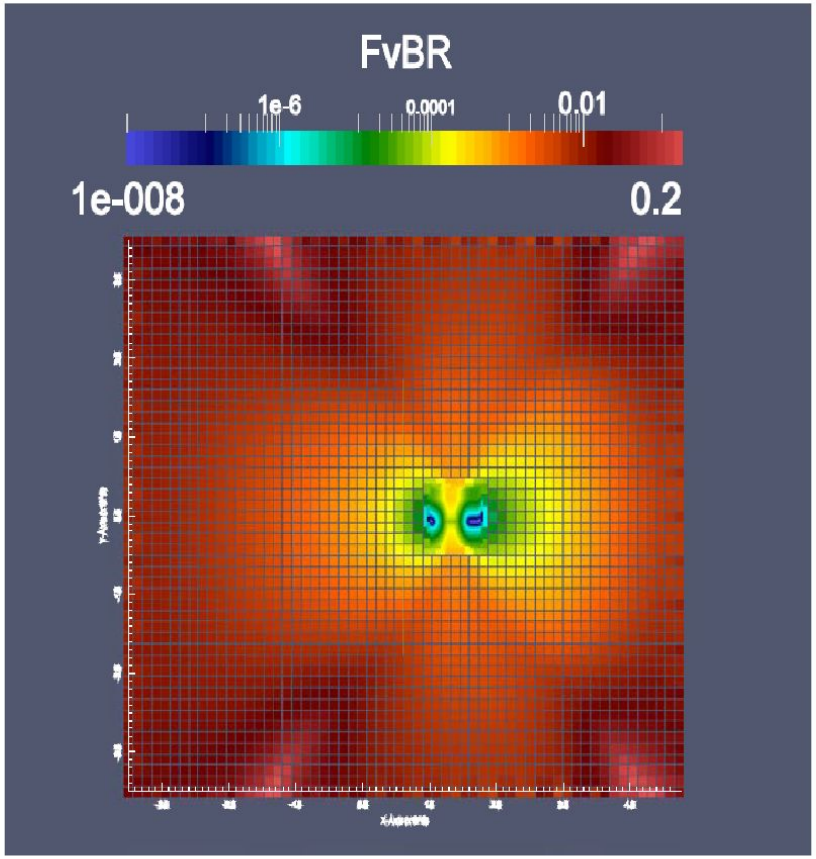
Определяется наибольший отклик с максимальной амплитудой поля Ex на определенной частоте. Таким образом, используется оптимальная частота передатчика для дальнейших исследований.

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

Суперпозиция полей

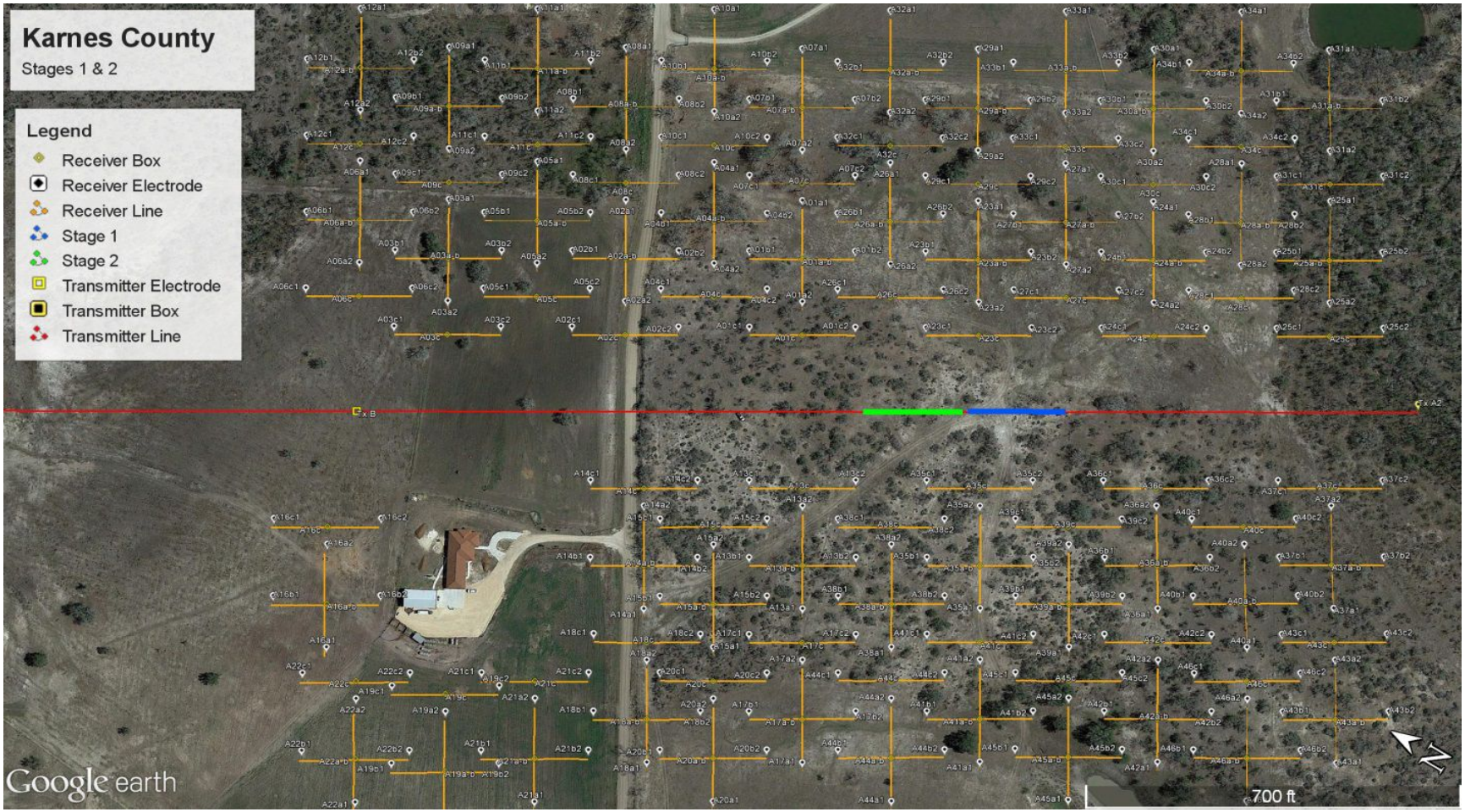
Отклик среды:

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



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

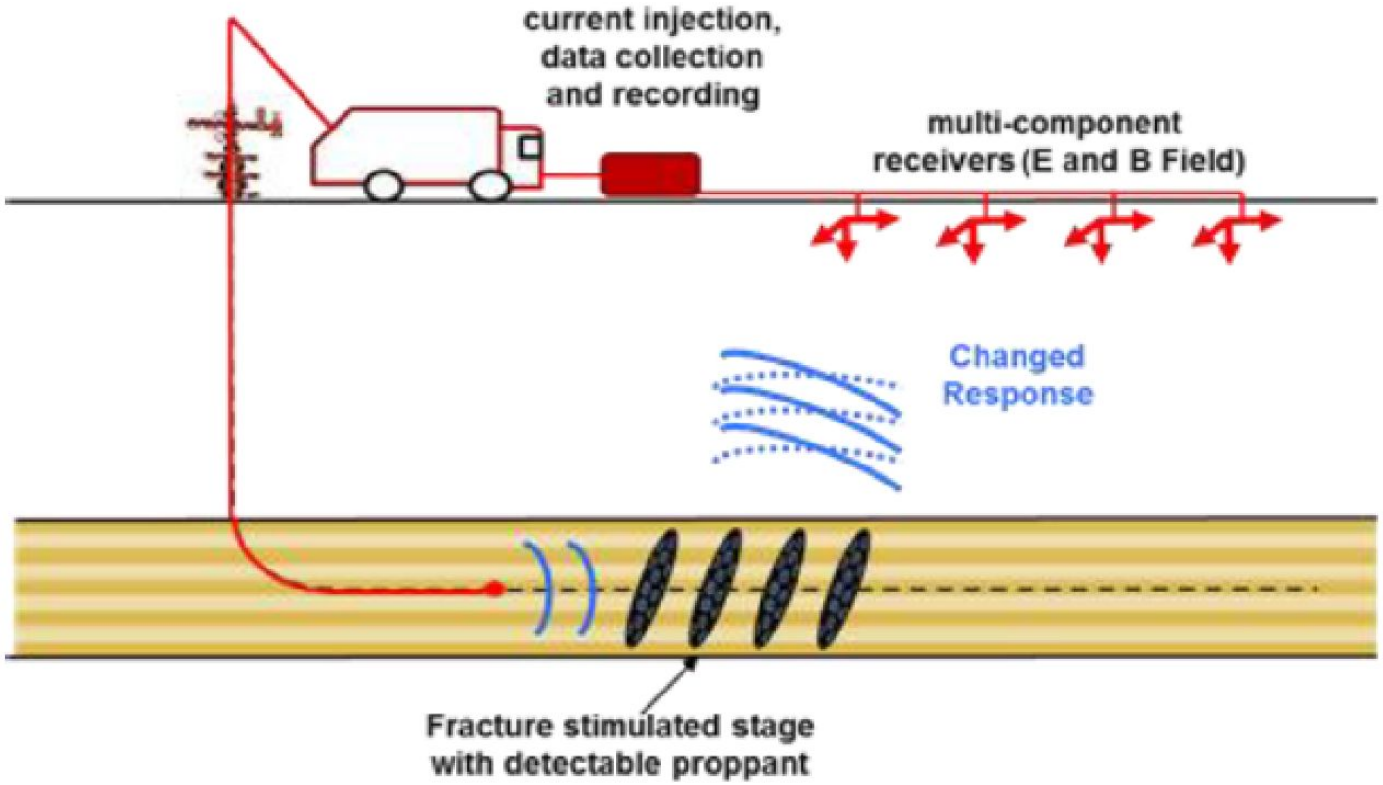
- Ортогональная ориентация RX-диполя предоставляет больше информации о зоне ГРП, но сила сигнала обычно на два порядка ниже, чем у сигналов, использующих продольную ориентацию RX-диполя.

- Больший 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.

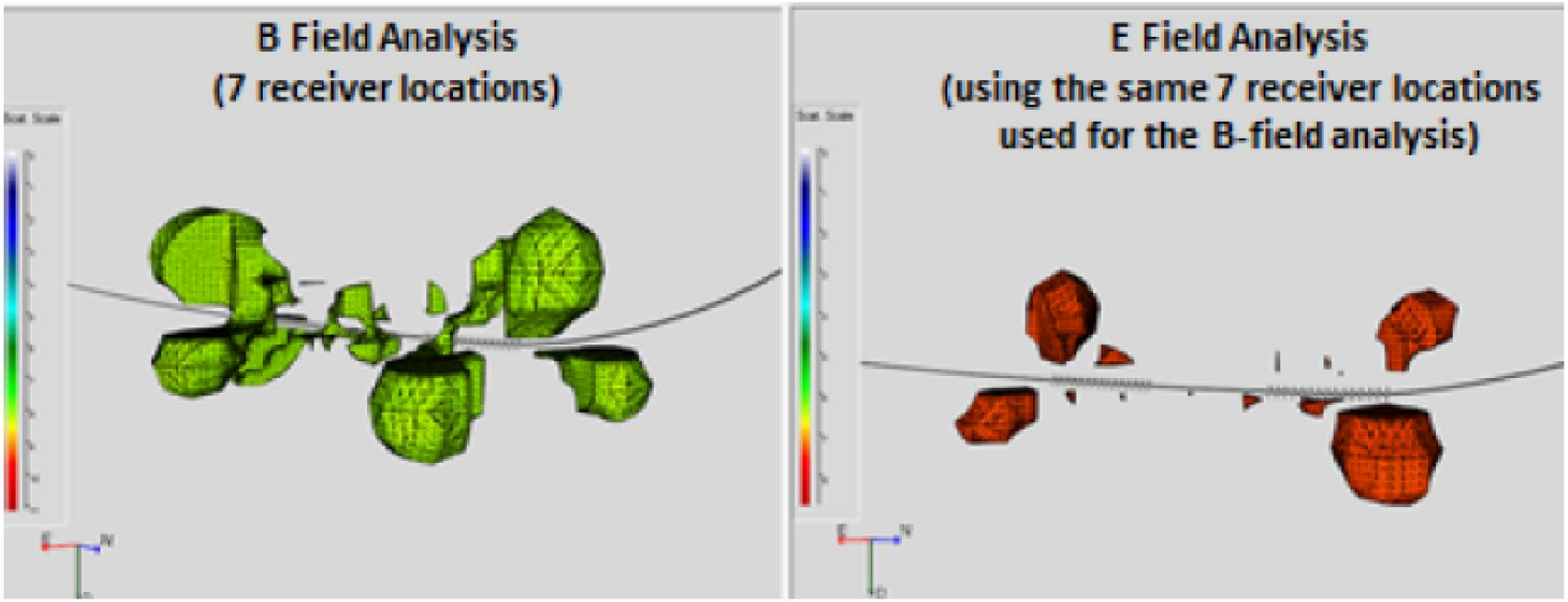
- Чтобы уменьшить краевые эффекты, вызванные диполем передатчика, его длина увеличивается в 6-7 раз.

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

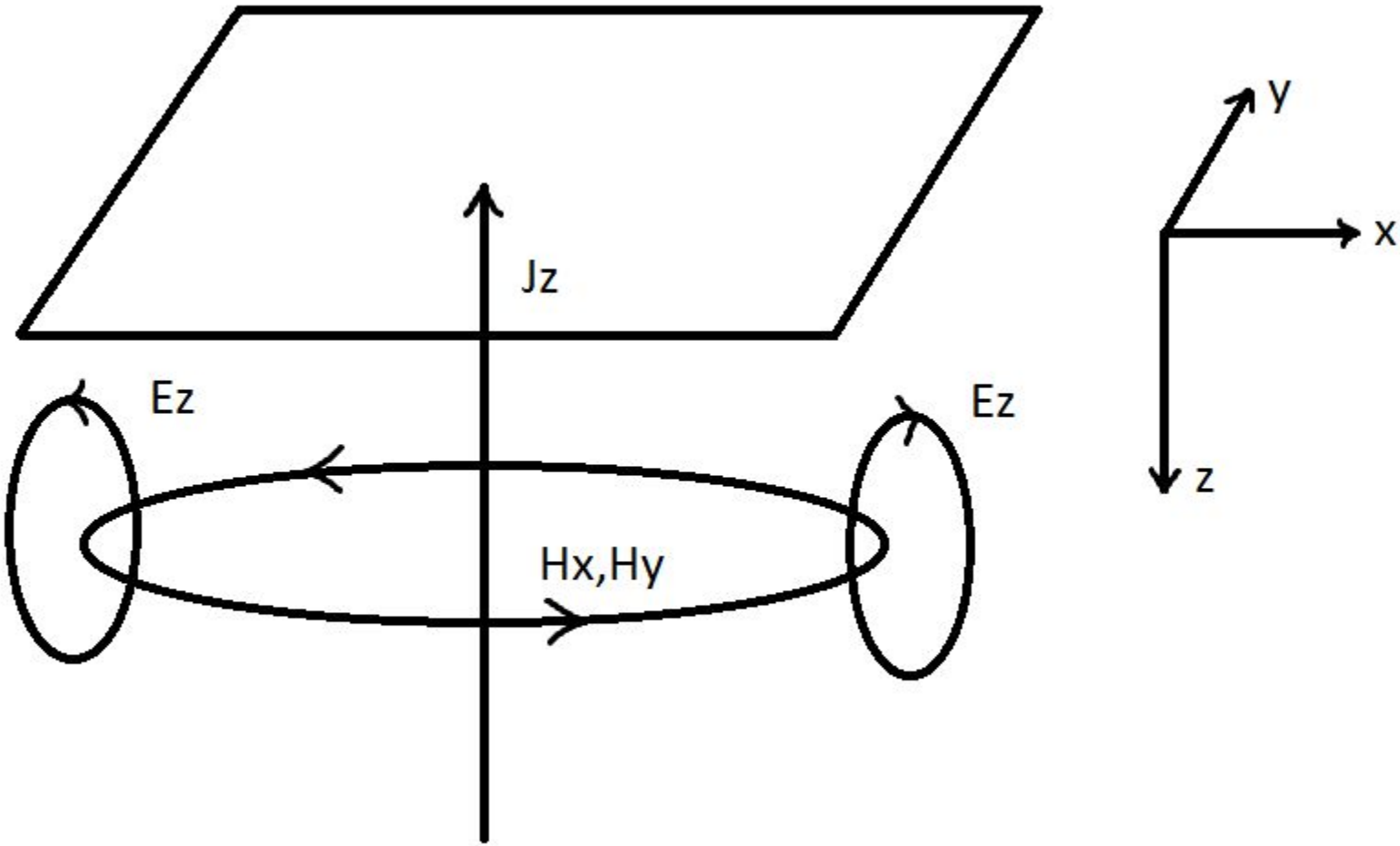


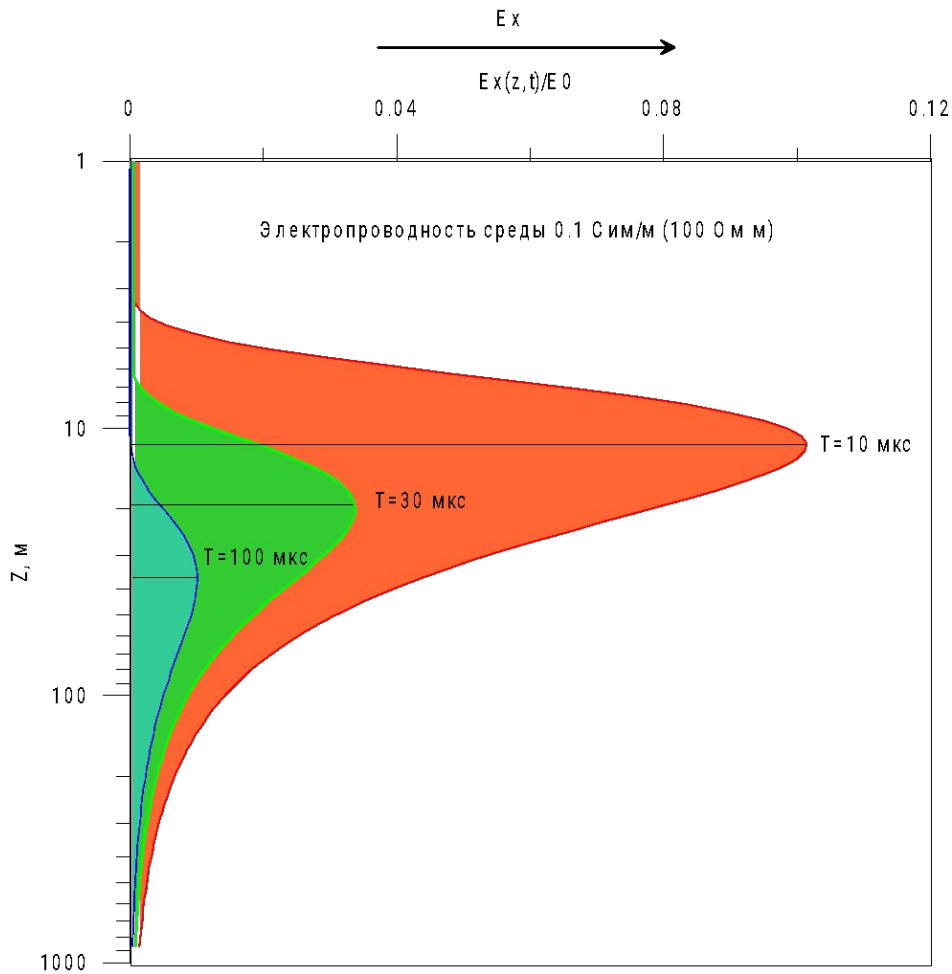
Сравнение местоположения проппанта ЭМ, определенного по семи датчикам магнитного поля (B-поле) (слева) и семи датчикам электрического поля (E-поле) (справа), расположенным в тех же местах, что и магнитные датчики. Хотя изображение отличается от изображения, полученного с использованием восемнадцати детекторов (из-за недостаточного количества датчиков), эти два изображения очень похожи друг на друга, причем B-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

$Ez = 0$ и $Ey = 0$ и $\frac{\partial Ex}{\partial x} = \frac{\partial Ex}{\partial y} = const$.

Тогда

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

Если решать данную краевую задачу при следующих граничных условиях:

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

получим

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

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**.