

УДК 550.837

## ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА ГРП ДЛЯ ОЦЕНКИ СТИМУЛИРОВАННОГО ОБЪЕМА ПОРОД

Г.С. Григорьев<sup>1</sup>, М.В. Салищев<sup>1</sup>, П.Ю. Пушкарев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-Технический Центр «Газпром нефти» (ООО «Газпромнефть НТЦ»). 190000, Россия, г. Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, д. 75–79; e-mail: Grigorev.GS@gazpromneft-ntc.ru

<sup>2</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова. 119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1

**Аннотация.** Данное исследование направлено на поиск технологических решений в области развития несейсмических методов при разработке нефтегазовых месторождений. Актуальной задачей при разработке месторождений является вопрос мониторинга гидроразрыва пласта: определения геометрии трещин, зон, закрепленных проппантом. В данной работе было проведено прямое моделирование электромагнитного отклика среды до и после проведения гидроразрыва пласта.

**Ключевые слова.** ГРП, мониторинг ГРП, электроразведка.

## ELECTROMAGNETIC FRACTURING MONITORING APPLICATION FOR PROPPED RESERVOIR VOLUME DETERMINATION

G.S. Grigoriev<sup>1</sup>, M.V. Salichshev<sup>1</sup>, P.Yu. Pushkarev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Gazpromneft NTC LLC. 75–79 Moika river emb., Saint-Petersburg, Russia, 190000; e-mail: Grigorev.GS@gazpromneft-ntc.ru

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University. Moscow, Leninskiye Gory, 1, Russia, 119991

**Abstract.** This article is aimed at the technological research in the field of non-seismic methods in oil and gas development. Proper hydraulic fracturing monitoring is one of the main unsolved issue: fracture geometry and propped reservoir volume determination. In this study forward electromagnetic modelling before and after fracking were done.

**Key words.** Hydraulic fracturing, fracturing monitoring, electromagnetic methods.

**ВВЕДЕНИЕ.** Одним из ключевых вопросов проведения гидроразрыва пласта (ГРП) является определение положения и объема трещин, закрепленных проппантом. Основным инструментом мониторинга ГРП является микросейсмический мониторинг. Потенциально перспективным направлением геофизического мониторинга также является электромагнитный (ЭМ) мониторинг, потенциально решающий задачу определения зон, закрепленных проппантом. В основе метода лежит зависимость амплитуды компонент электромагнитного поля от величины и структуры электропроводящего объема, созданного закачанном в пласт проппантом.

Целью данной работы является оценка принципиальной возможности электромагнитного мониторинга ГРП баженовской свиты на основе решения прямой задачи.

Ввиду слабой интенсивности естественного ЭМ-поля на уровне большой интенсивности техногенных ЭМ-помех предпочтительнее использование ЭМ-поля контролируемого источника. При этом наиболее информативно использование источника, заземленного с помощью скважины. Один электрод обычно располагается в устье скважины, а второй – в исследуемом пласте (в создаваемом коллекторе).

Наилучший результат обеспечивают низкочастотные скважинно-наземные исследования. Исходя из опыта изучения осадочных бассейнов до глубин порядка первых километров, это частоты примерно 100–0,1 Гц (периоды 0,01–10 с), на которых поле имеет квазистационарную структуру. Отметим, что измерения можно проводить как в частотной, так

и во временной области, при этом соответствующий диапазон времен составит примерно 0,002–2 с (2–2000 мс).

В рамках настоящего исследования требовалось оценить возможности ЭМ-мониторинга ГРП применительно к возможностям мониторинга ГРП баженовской свиты в Западной Сибири. Под ЭМ-мониторингом понимаются повторные низкочастотные (в квазистационарном приближении) исследования с источником в скважине и приемными линиями на дневной поверхности.

### Геоэлектрическая модель

Для проведения моделирования была составлена 3D геоэлектрическая модель, состоящая из фонового горизонтально-слоистого разреза и аномальной неоднородной электропроводящей зоны, отвечающей системе трещин, заполненных проппантом. В соответствии с возможностями используемой программы 3D-моделирования геоэлектрическая модель была в итоге представлена в виде совокупности однородных по удельному электрическому сопротивлению (УЭС) изотропных блоков, каждый из которых представляет собой призму с гранями, параллельными координатным плоскостям  $xOy$ ,  $xOz$ ,  $yOz$ . Фоновый разрез был составлен на основе данных БК и представлен на рис. 1.

Разрез включает весь осадочный чехол и заканчивается высокоомным (31 Ом·м) доюрским комплексом, залегающим на глубине 2467 м. В осадочном чехле выделяется 12 слоев, сопротивления которых меняются от 1,5 до 11 Ом·м. Большая суммарная

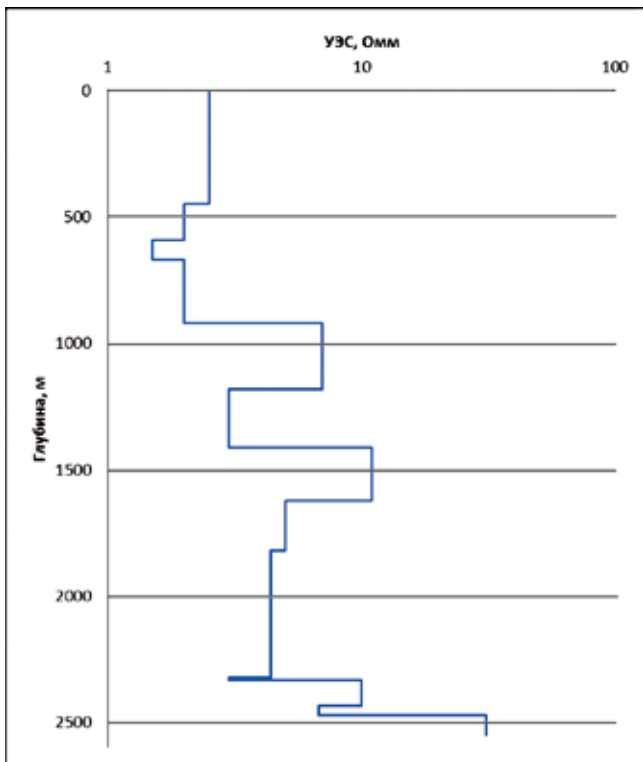


Рис. 1

Фоновая геоэлектрическая модель, полученная по данным БК

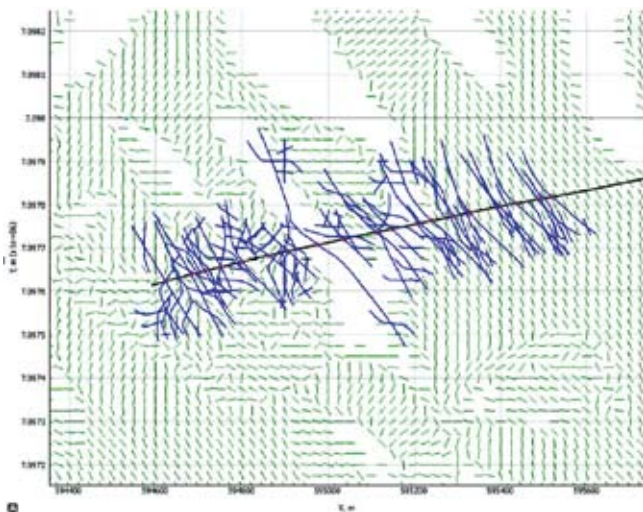


Рис. 2

Типичная модель распространения трещин на основе прямого расчета

продольная проводимость осадочного чехла (более 600 См) затрудняет выявление аномалий в его нижней части.

На основе прямого расчета была получена модель распределения трещин, образовавшихся в результате ГРП.

Трещины насыщены проппантом с высокой электропроводностью от 1 000 до 1 000 000 См/м.

Поскольку раскрытость трещин составляет порядка 1 см и меньше, а горизонтальный размер трещиноватой зоны составляет свыше 1 км при глубине залегания свыше 2 км, для моделирования нужно

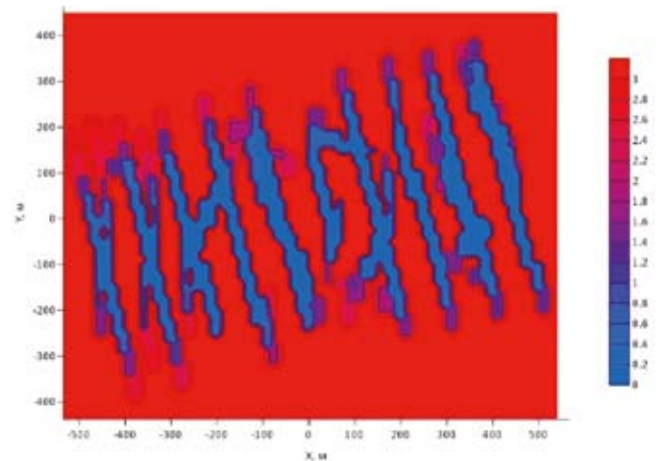


Рис. 3

Сопротивление интересующего интервала в Ом·м при размере блока 6,25 м

было преобразовать рассмотренную модель в эквивалентную, состоящую из достаточно крупных блоков. Для этого в диапазоне глубин 2318–2355 м в центральную часть модели добавлены блоки, сопротивления которых были выбраны таким образом, чтобы давать осредненное значение в соответствующем объеме модели с трещинами.

Чтобы определить УЭС каждого блока, было оценено, какую часть его объема занимают насыщенные проппантом трещины. УЭС блока оценивалось по упрощенной формуле Арчи – Дахнова как произведение параметра пористости на УЭС проппанта.

На рис. 3 приведено распределение сопротивления в слое при размере однородных блоков 6,25 x 6,25 м.

### Методика и результаты моделирования

Для решения прямой задачи использовалась программа В.Л. Друскина и Л.А. Книжнермана [Друскин и Книжнерман, 1988], позволяющая решать прямые электромагнитные 3D-задачи в квазистационарном приближении в частотной и временной области. В качестве возбудителей поля может использоваться плоская волна или совокупность электрических и магнитных диполей.

Программа основана на методе конечных разностей. Область моделирования покрывается прямоугольной сеткой, в узлах которой определяются компоненты поля. Сетка должна быть составлена так, чтобы расстояние между узлами было по возможности мало, а расстояние до границ области моделирования – велико (по сравнению с длиной волны). Модель среды в программе представляет собой совокупность прямоугольных параллелепипедов, погруженных в однородное полупространство, поэтому каждый слой фонового разреза представлял собой параллелепипед с границами, удаленными до краев области моделирования. Трехмерные неоднородности, соответственно, представляли собой компактные параллелепипеды.

Питающая линия была составлена из вертикальных электрических диполей, начиналась у земной поверхности и заканчивалась на глубине 2355 м.

Точки наблюдения располагались на земной поверхности с шагом 100 м. В каждой точке наблюдения находились по два приемника горизонтальных электрических компонент поля ( $E_x$  и  $E_y$ ) и по три приемника магнитных компонент ( $B_x$ ,  $B_y$  и  $B_z$ ).

Набор частот, на которых рассчитывалось поле, отвечал диапазону от 0,01 до 10 Гц, при этом каждая последующая частота отличалась от предыдущей в два раза.

Решение в программе ищется итерационным способом. С ходом итераций программа анализирует поведение поля в контрольном приемнике. Выбор контрольного приемника во многом определяет точность получаемого результата. Обычно в качестве контрольного выбирается приемник с минимальным значением поля. В данном случае был выбран приемник на максимальном расстоянии от источника.

Решение прямой задачи было получено для двух моделей: модели с однородным интересующим слоем (3 Ом·м) и модели с неоднородной зоной в этом слое. Эти модели, соответственно, отвечали ситуациям до и после ГРП. Далее расчеты были повторены для более проводящих аномалий, отвечающих пропантам с повышенной электропроводностью.

Результаты представлялись в виде графиков модулей компонент поля в зависимости от частоты в отдельных точках наблюдения (кривые зондирования) и в зависимости от расстояния на отдельных частотах (графики профилирования). Анализируя эти графики, можно выделить благоприятные участки и частоты, на которых электропроводящая трещиноватая зона проявляется наиболее интенсивно, и величина соответствующей аномалии превышает 1%, что делает возможным ее выявление на практике.

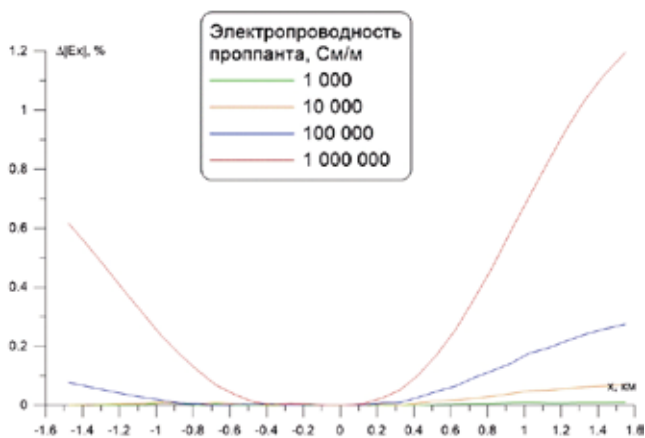
На рис. 4 и 5 представлены графики поля по профилю, пересекающему в центральной части скважину с источником. Показаны, соответственно, аномалия  $|E_x|$  (по сравнению с величиной для модели горизонтально-слоистой среды, т.е. без пропанта) и величина  $|B_y|$ .

На рис. 4 приведены аномальные значения  $E_x$ , модуль разности значений с пропантом и без, нормированный на значение без пропанта, то видно, как аномалия возрастает от почти 0% до более чем 1% с ростом электропроводности пропанта от 1 000 до 1 000 000 См/м.

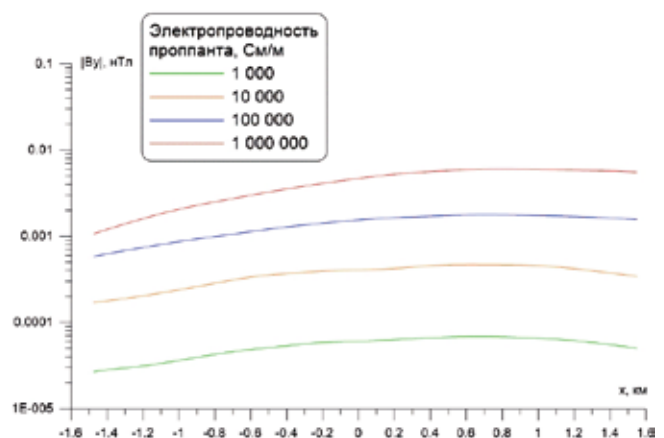
Рис. 5 демонстрирует эффект в магнитном поле. Прежде всего поле вертикального электрического диполя (ВЭД) в горизонтально-слоистой среде (ГСС) имеет три компоненты:  $E_x$ ,  $E_z$  и  $B_y$  (остальные три равны нулю). Более того, на земной поверхности  $E_z$  и  $B_y$  также равны нулю. Таким образом, магнитное поле ВЭД на поверхности ГСС отсутствует. Но если появляется проводящая неоднородность (насыщенная пропантом область), то возникает магнитное поле, позволяющее ее картировать. На рис. 5 показаны графики азимутальной магнитной компоненты.

Таким образом, магнитное поле в данной задаче является информативным. Можно также рассмотреть вертикальную компоненту  $B_z$ . Она отсутствует в ГСС, причем везде (не только на поверхности земли, но и внутри нее). Но при наличии проводящих аномалий в  $B_z$  также должна наблюдаться соответствующая аномалия. Компоненту  $B_z$  на поверхности достаточно просто измерить, для этого используются петли.

Нерешенным остается вопрос о возможности определения контура трещиноватой зоны и выявления внутри нее зон более и менее интенсивной трещиноватости, с наличием и с отсутствием пропанта. Для его решения необходимо выполнить больший объем моделирования с использованием более широкого модельного ряда, разных вариантов расположения источника и системы наблюдений. На этой основе, с использованием различных трансформаций и способов визуализации сигнала, можно попытаться выработать оптимальную методику решения указанной задачи.



**Рис. 4**  
3D-моделирование ЭМ-мониторинга ГРП.  
АВ:  $x = 0, y = 0, z = 0 - 2355$  м.  
Аномалия  $|E_x|$  по профилю  
 $x = -1500 - 1500$  (шаг 100 м),  
 $y = 0, z = 0$  на частоте 0,04 Гц



**Рис. 5**  
3D-моделирование ЭМ-мониторинга ГРП.  
АВ:  $x = 0, y = 0, z = 0 - 2355$  м.  
Компонента  $|B_y|$  по профилю  
 $x = -1500 - 1500$  (шаг 100 м),  
 $y = 0, z = 0$  на частоте 0,04 Гц

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** В результате данного исследования была составлена геоэлектрическая модель и выполнено моделирование скважинно-наземных повторных наблюдений, показавшее существенное (более 1%) влияние электропроводящей трещиноватой зоны, образовавшейся при ГРП с высокопроводящим проппантом, на измеряемое ЭМ-поле.

В целом проведенное исследование подтверждает потенциальную возможность применения электромагнитного мониторинга ГРП. При этом сила тока в контролируемом источнике должна составлять порядка 100 А, а диапазон используемых частот – от 0,1 до 100 Гц.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Друскин В.Л., Книжнерман Л.А. Спектральный дифференциально-разностный метод численного решения трехмерных нестационарных задач электроразведки // Физика Земли. 1988. № 8. С. 63–74.

2. Hickey M.S., Trevino S., Everett M. Monitoring hydraulic fracturing fluid movement using ground-based electromagnetics, with applications to the Anadarko basin and the Delaware basin. Unconventional resources technology conference (URTeC). USA, Austin (Texas), 2017, 12 p.

3. Palisch T., Al-Tailji W., Bartel L., Cannan C., Zhang J., Czapski M., Lynch K. Far-field proppant detection using electromagnetic methods: latest field results. SPE hydraulic fracturing technology conference and exhibition. USA, The Woodlands (Texas), 2017, 12 p.

4. Rees N., Heinson G., Conway D. Monitoring hydraulic stimulation using telluric sounding. *Earth, Planets and Space*, 2018, 70:7, 12 p.

Однако окончательное заключение о применимости метода возможно только после проведения дополнительных исследований на модельных данных.

Основными дальнейшими направлениями исследования являются:

- моделирование скважинных измерительных установок;
- решение обратной задачи на модельных данных;
- проведение моделирования с проппантом-изолятором.

## REFERENCES

1. Druskin VL, Knizhnerman LA. Spectralnyi differentsialno-raznostnyi metod chislennogo resheniya trehmernykh zadach electrorazvedki [Spectral differential method of forward 3D modelling]. *Physica Zemli*. 1998; (8): 63–74 (in Russian).

2. Hickey MS, Trevino S, Everett M. Monitoring hydraulic fracturing fluid movement using ground-based electromagnetics, with applications to the Anadarko basin and the Delaware basin. Unconventional resources technology conference (URTeC). USA, Austin (Texas), 2017. 12 p.

3. Palisch T, Al-Tailji W, Bartel L, Cannan C, Zhang J, Czapski M, Lynch K. Far-field proppant detection using electromagnetic methods: latest field results. SPE hydraulic fracturing technology conference and exhibition. USA, The Woodlands (Texas), 2017. 12 p.

4. Rees N, Heinson G, Conway D. Monitoring hydraulic stimulation using telluric sounding. *Earth, Planets and Space*. 2018, 70:7, 12 p.

Положительная рецензия от 15.08.2018

Решение редколлегии о публикации от 31.08.2018

## ОБ АВТОРАХ



### ГРИГОРЬЕВ

Глеб Сергеевич

*Ведущий специалист группы методического сопровождения геолого-разведочных работ в департаменте региональной геологии Научно-Технического Центра «Газпром нефти» (ООО «Газпромнефть НТЦ»). Основные научные интересы – сейсмические методы проведения геолого-разведочных работ: интерпретация и комплексирование данных.*



### САЛИЩЕВ

Михаил Всеволодович

*Главный специалист отдела геологии и анализа запасов в управлении проектов нетрадиционных запасов Научно-Технического Центра «Газпром нефти» (ООО «Газпромнефть НТЦ»). Основные научные интересы – микросейсмический мониторинг ГРП: обработка, интерпретация, применение сейсморазведочных работ для нетрадиционных резервуаров.*



### ПУШКАРЕВ

Павел Юрьевич

*Доктор геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Окончил геологический факультет МГУ в 1998 г. Научные интересы – электромагнитные зондирования земли с использованием естественных и искусственных источников. Автор 50 научных статей.*