



УДК 004.93:550.8

Д. Н. Гапеев, Г. Н. Ерохин, Р. Д. Седайкин, В. И. Строков

**ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗАВОДНЕНИЯ
НА МЕСТОРОЖДЕНИИ СЕВЕРНАЯ ТРУВА**

Представлены результаты пассивного микросейсмического мониторинга процесса закачки воды в одну из скважин карбонатного месторождения. Построены карты пространственного распределения источников и проведен анализ динамических параметров микросейсмических событий совместно с графиками давлений и объемов закачки. Показана возможность оперативного контроля процесса заводнения на примере месторождения Северная Трува.

133

Results of passive microseismic monitoring of water injection into one of the wells of the carbonate deposits are presented. The maps of the spatial distribution of sources have prepared and the analysis of the dynamic parameters of microseismic events together with graphs of pressure and injection volumes has done. The possibility of operational control of the process of flooding is shown on the example of Northern Truva.

Ключевые слова: микросейсмический мониторинг, обратная кинематическая задача, обратная динамическая задача, заводнение.

Key words: microseismic monitoring, inverse kinematic problem, inverse dynamic problem, waterflood.

Как известно, уменьшение дебитов нефти при разработке месторождений углеводородов (УВ) может быть связано с увеличением обводненности извлекаемой продукции и совершенно не связано с количеством запасов нефти на данном месторождении. Причиной обводненности служит закачка жидкости в породу для поддержания пластовых давлений. Естественное стремление повысить дебит нефти приведет к дополнительным издержкам на исследование схемы разработки.

Проведены полевые работы по пассивному микросейсмическому мониторингу процесса закачки воды в скважину № СТ11 месторождения Северная Трува, Республика Казахстан. Целевым интервалом исследований является верхняя карбонатная толща КТ-I, Гжельский и Касимовский ярус. Абсолютная глубина интервала перфорации – 2390 – 2325 м. Скважина №СТ-11 переведена на нагнетание с апреля 2013 г. Начальные объемы закачки технической воды составляли 300 м³/сут, впоследствии объемы увеличились до 400, 500 – 600 м³/сут.

Для анализа фронта вытеснения скважины №СТ11 применялся метод *MicroseismicCSP* [1–4]. Он основан на регистрации микросейсмических шумов с помощью поверхностной малоапертурной сейсмической



антенны, установленной непосредственно над очагом микросейсмической эмиссии. Используемая система наблюдения позволяет пренебречь влиянием рефракции волн, неоднородности и анизотропии геологической среды на результат получаемого решения. Такой подход возможен для сигналов, распространяющихся практически вдоль прямолинейного вертикального луча от источника к приемнику (для апертуры диаметром 800–1000 м при глубинах 2500–2800 м – максимальный угол отличается от вертикали не более чем на $7-10^\circ$) [5]. Также условия расположения антенны позволяют использовать при расчетах гипоцентров событий интегральную скорость распространения сейсмических волн.

Регистрация сейсмоакустической эмиссии осуществлялась цифровой 48-канальной телеметрической станцией SGD-SHF48 производства ООО НПК «СибГеофизПрибор». Система наблюдений была установлена в эпицентральной области микросейсмической активности, в радиусе 400–500 м от устья скважины. Сейсмическая антенна представляет собой совокупность однокомпонентных датчиков, удаленных друг от друга на расстояние 30–100 м. Синхронизация каналов регистрации осуществляется с помощью системы GPS с точностью порядка 100 мкс. Координатная привязка осуществляется дифференциальным GPS-приемником. Длительность наблюдений составила 19 дней, всего было получено более 415 Гбайт первичных микросейсмических данных.

На основе специализированной обработки данных мониторинга скважины №СТ11 локализованы источники микросейсмических событий. Результаты решения обратной кинематической задачи позволили определить координаты и время возбуждения источников, значения средних скоростей распространения сейсмических волн от выделенных источников до дневной поверхности.

На основе решения обратной динамической задачи был получен тензор сейсмического момента, что позволило определить энергетические параметры выделенных микросейсмических событий. Соответствующие параметры характеризуют процессы микросейсмической активности при закачке воды в нагнетательную скважину №СТ11 месторождения Северная Трува.

По результатам решения обратных задач осуществлено построение карт распределения источников микросейсмических событий с учетом их энергии и привязкой к соответствующим интервалам перфорации ствола скважины №СТ11. На основе анализа развития областей микросейсмической активности во времени осуществлена оценка направления движения закачиваемой воды (области заводнения).

На рисунке 1 дано развитие области микросейсмической активности в районе скважины №СТ11 по дням наблюдений. Активность представлена в виде изоповерхности плотности энергии микросейсмических событий по уровню энергии 98%. Для формирования этой поверхности используется алгоритм построения полигональных поверхностей на основе интерполяции параметров микросейсмических событий.

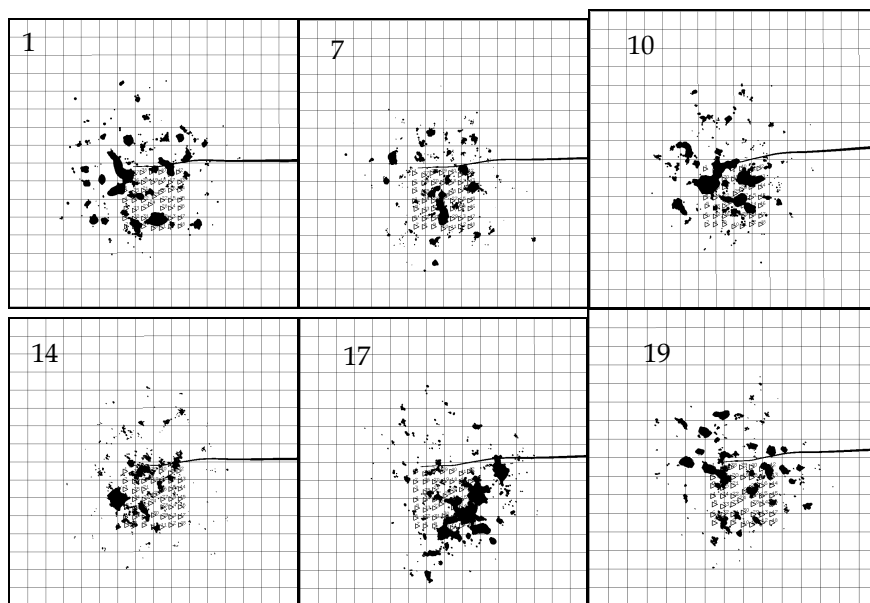


Рис. 1. Изоповерхность плотности энергии микросейсмических событий, зарегистрированных в районе скважины № СТ11 месторождения Северная Трува в проекции на дневную поверхность. Шаг сетки равен 100 м; изоповерхность вмещает 98 % энергии микросейсмической эмиссии; черная линия обозначает траекторию ствола скважины

На основе анализа пространственного распределения микросейсмических событий можно сделать заключение, что основная масса микросейсмических событий располагается внутри окружности с центром в интервале перфорации ствола скважины № СТ11 и радиусом 400 м. Развитие облака микросейсмической активности во времени дает основание предполагать, что фронт заводнения распространяется равномерно во всех направлениях относительно нагнетающей скважины.

На рисунке 2 представлены средние значения энергий зарегистрированных микросейсмических событий (E_{cp}) по дням наблюдений, совмещенные с графиками закаченных объемов Q и трубного давления $P_{тр}$ в скважине № СТ11. Можно заметить, что 11 августа (4-й день наблюдений) наблюдается уменьшение суточных объемов закачки воды на фоне постоянных трубных давлений. Соответствующий процесс сопровождается ростом средних значений энергии микросейсмических событий. Можно отметить рост значений средней энергии микросейсмических событий в период с 9 по 15 день наблюдений, что можно связать с небольшим ростом трубного давления в скважине. Процесс падения давления и уменьшения объема закачки (начиная с 14 дня) отмечается падением средних значений энергии микросейсмических событий.

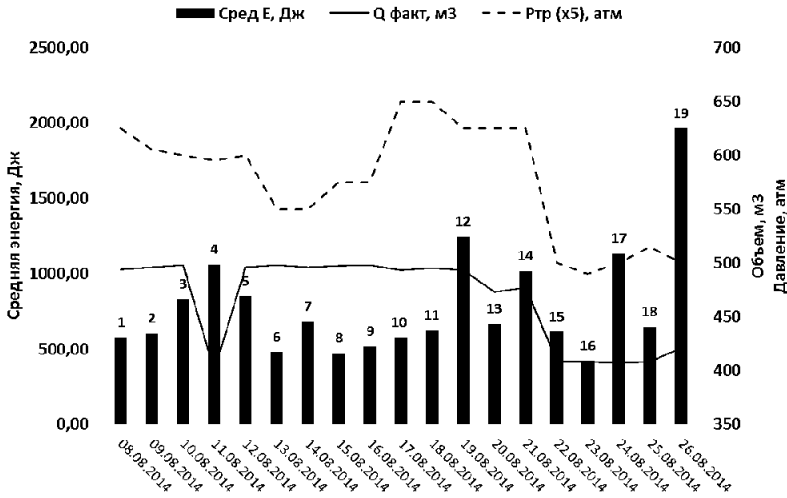


Рис. 2. Гистограмма средних энергий микросейсмических событий, совмещенные с графиками закаченных объемов Q и трубного давления Pтр

На рисунке 3 проиллюстрирована некомпенсированная часть энергии деформаций изотропного расширения dP зарегистрированных микросейсмических событий по дням наблюдений, совмещенная с графиками закаченных объемов Q и трубного давления Pтр в скважине № СТ11. Данный график показывает общее значение энергии, затраченной на увеличение/уменьшение объема равномерно по всем координатным осям.

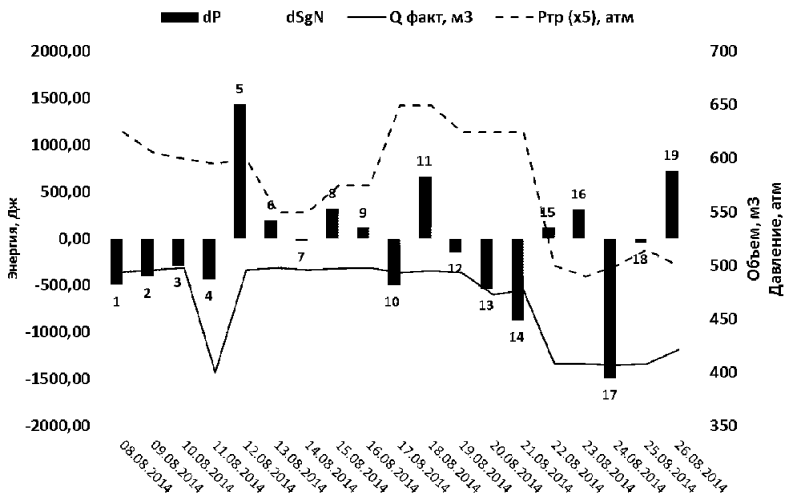


Рис. 3. Гистограмма некомпенсированной части энергии деформаций изотропного расширения dP и максимальных напряжений отрыва $dSgN$, совмещенные с графиками закаченных объемов Q и трубного давления Pтр



Как можно видеть из графиков, в дни наблюдений 1–4, 10, 12–14 и 17 некомпенсированная часть энергии деформаций изотропного расширения была затрачена на уменьшение объема (отрицательные значения). Для дней наблюдений 5–6, 8–9, 11, 15–16 и 19 некомпенсированная часть энергии деформаций изотропного расширения была затрачена на увеличение объема (положительные значения). За все время наблюдения общий баланс энергии, потраченной на изотропное расширение и сжатие, сохраняется.

Некомпенсированная часть энергии максимальных напряжений отрыва SgN отвечает за раскрытие и схлопывание трещин. На рисунке 3 представлена гистограмма некомпенсированной части энергии максимальных напряжений по дням наблюдений в скважине № СТ11 месторождения Северная Трува. Из графика видно, что для дней наблюдений 5, 8–9, 12–13, 15–16 энергия, выделенная в процессе открытия трещин (положительные значения), преобладает над энергией закрытия трещин. Для 1–4, 6, 10, 14 и 19 дней наблюдения энергия, излученная в процессе закрытия трещин (отрицательные значения), преобладает над энергией открытия трещин.

Для дней наблюдения 5, 8–9 и 15–16 основное отличие процесса нагнетания жидкости заключается в том, что для них характерны процессы увеличения объема. Основанием для этого является положительное значение некомпенсированной части энергии деформаций изотропного расширения dP . Также для этих дней наблюдаются положительные значения некомпенсированной части энергии максимальных напряжений отрыва $dSgN$, что может указывать на процессы раскрытия трещин.

Для дней наблюдений 1–4, 10, 14 и 18 характерны процессы уменьшения объема и схлопывания трещин. Основанием для этого стало отрицательное значение некомпенсированной части энергии деформаций изотропного расширения (P) и отрицательные значения некомпенсированной части энергии максимальных напряжений отрыва (SgN).

Следует отметить, что смена режимов закачки (падение/рост трубного давления и уменьшение/увеличение объема закачки воды) отмечается на графиках параметров dP и $dSgN$. Соответствующие закономерности отмечаются на графиках в следующем виде.

1. Одновременная смена знаков параметров с положительного на отрицательное и наоборот. Соответствующие переходные процессы отмечаются в 4 и 5-й дни наблюдения – понижение объема закачки; в 9-10-й дни наблюдения – повышение трубного давления; в 14–15-й дни наблюдения – понижение трубного давления и объема закачки.

2. Различия знаков параметров: 6–7-й дни наблюдения, что можно связать с повышением трубного давления; 12–13-й дни наблюдения – смена режима закачки, уменьшение расхода жидкости; в 19-й день наблюдений – небольшое увеличение объемов закачиваемой воды и снижение трубного давления.

По результатам анализа энергетических параметров микросейсмических событий: средней энергии, процентного соотношения энергии, потраченной на открытие/закрытие трещин, энергии, затраченной на



увеличение/уменьшение объема, энергии, отвечающей за раскрытие и схлопывание трещин; можно отметить определенное соответствие технологических режимов закачки и рассматриваемых параметров.

Выводы

Развитие облака микросейсмической активности в районе скважины № СТ11 во времени дает основание предполагать, что фронт заводнения распространяется равномерно во всех направлениях относительно нагнетающей скважины, радиус фронта составляет не менее 400 м. По всей видимости, нагнетательная скважина № СТ11 месторождения Северная Трува выполняет свои основные функции по вытеснению нефти к добывающим скважинам и поддержанию пластового давления.

Результаты микросейсмического мониторинга на данном этапе дают возможность наблюдать за динамическими характеристиками фронта заводнения и оценивать эффективность работы нагнетательных скважин в первом приближении. Однако для достоверных выводов необходимо расширить сеть наблюдаемых скважин с различными технологическими и геологическими условиями, а также увеличить временной интервал микросейсмического мониторинга (для увеличения статистической базы исследования). Для всестороннего анализа также требуются корректные исходные данные по всем технологическим параметрам процесса закачки.

Проведенные работы с использованием микросейсмического мониторинга подтвердили возможность контроля процессов заводнения, что позволяет оперативно получать данные о направлении развития фронта заводнения, сопоставлять полученные данные с технологическими параметрами режимов закачки, межскважинном строении продуктивного пласта и на их основе совершенствовать систему разработки месторождения.

Авторы благодарят Б. Аманбаева за помощь в организации полевых работ, Д.И. Богордаева, К.С. Кутергина, Ф.Д. Шмакова за помощь в обработке данных микросейсмического мониторинга.

Список литературы

1. Erokhin, G.N., Bortnikov P.B. Inverse problem of determination of the earthquake source seismic moment tensor // *Geology and Geophysics*. 1987. № 4. P. 115–123.
2. Anikonov U.E., Bubnov B.A., Erokhin G.N. Inverse and Ill-Posed Sources Problems // *VSP*. 1997.
3. Erokhin G.N., Mynagashev S.M., Bortnikov P.B., et. al. 2008, The technique of hydrocarbons deposit hydraulic fracturing monitoring; RU. № 2 319 177. Published 2008.10.09. Bulletin 7.
4. Erokhin G.N., Baranov V.D., Kremlev A.N., et. al. Small Microseismic Surface Acquisition System Case Study // 76th EAGE Conference Amsterdam RAI. The Netherlands. 16–19 June 2014. WS10-B02.



5. Шмаков Ф.Д., Бортников П.Б., Кузьменко А.П. Моделирование параметров решения задачи локации в методе наземного микросейсмического мониторинга гидравлического разрыва пласта // Приволжский научный вестник. 2013. № 3(19). С. 28–39.

6. Дэниелс Дж., Шнабель Р. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений. М., 1988.

Об авторах

Денис Николаевич Гапеев – науч. сотр., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: DGapeev@kantiana.ru

Геннадий Николаевич Ерохин – д-р физ.-мат. наук, проф., директор НИИ ПИиМГ, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: GErokhin@kantiana.ru

Роман Дмитриевич Седаикин – ведущий программист, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: RSedaikin@kantiana.ru

Виталий Игоревич Строков – ведущий программист, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: ViStrokov@kantiana.ru

About the authors

Denis Gapeev – researcher, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: DGapeev@kantiana.ru

Prof. Gennady Erokhin – director of research institute, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: GErokhin@kantiana.ru

Roman Sedaikin – chief programmer, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: RSedaikin@kantiana.ru

Vitaliy Strokov – chief programmer, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: ViStrokov@kantiana.ru