

Опыт выделения зон растрескивания коллекторов по сейсмическим данным, полученным в процессе гидроразрыва пласта

В.А.Кочнев, В.С.Поляков, И.В.Гоз – Институт вычислительного моделирования СО РАН
И.В.Брыксин, В.Г.Савин, Б.К.Зоммер – ОАО «Хантымансийскгеофизика»

Введение

В зарубежной литературе опубликовано немало статей [1–4], посвященных выделению зон растрескивания при закачке в пласт жидкости и пропанта под большим давлением. В этих зонах увеличивается трещиноватость и, как следствие, улучшаются коллекторские свойства пласта.

Для выявления подобных зон используются сейсмические данные, регистрируемые в глубоких скважинах, расположенных в окрестности скважины, в которую производится закачка жидкости с пропантом. Регистрация ведется однокомпонентными или трехкомпонентными приемниками на частотах в диапазоне от 100 до 1000 Гц.

Основой выявления отдельных локальных очагов растрескивания является регистрация Р и S-волн от каждого микроземлетрясения. Запаздывание S-волны от Р-волны (если эта пара волн выделена и четко идентифицирована) дает возможность оценить радиус сферы, на поверхности которой могло произойти микроземлетрясение. Имея удачные наблюдения этого события в трех скважинах, можно оценить координаты микроземлетрясения. Благоприятной предпосылкой для такого метода является ситуация, когда микроземлетрясения следуют с периодом не меньше, чем время запаздывания волны S относительно волны Р. В статьях приводятся удачные опыты применения метода, когда наблюдение ведется в течение многих часов. В [2] приводятся следующие сведения. Гидроразрыв проводился для создания в геотермальных условиях проницаемой зоны в гранитах между двумя скважинами. Эксперимент длился 61 час, под давлением 48МПа (480 атмосфер). На абсолютную глубину 3460 м было закачено 21000 м³ воды и было зарегистрировано около 11000 микроземлетрясений. Основная частота колебаний, судя по периоду (6-8 мс), составила 120-150 Гц. Длина импульса от 20 до 100 мс. Причем более протяженными и более интенсивными являются поперечные волны. Запись велась на аналоговый носитель, а затем была оцифрована с шагом 0.2 мс. Авторы цитируемой статьи имели примерно 20% данных и, следовательно, в этот интервал времени (11 ч. 15 мин.) произошло около 2000 микроземлетрясений. В обработку они выбрали только 157 событий. В другой статье [1] указывается на необходимость ручной корреляции и идентификации записей на разных скважинах. Приводя эти данные, мы хотим подчеркнуть, что большая плотность событий приводит к трудности интерпретации данных.

В последнее время используются ускоренные методы гидроразрыва, которые реализуются в течение получаса и, судя по резкому скачку давления, основной процесс гидроразрыва происходит в течение 10-20 мин и вызывает лавинообразное растрескивание коллектора. Это должно создавать низкочастотные колебания в очаге интенсивного растрескивания пласта, что создает предпосылки для регистрации этих колебаний на поверхности и определения гипоцентров зон интенсивного растрескивания коллекторов.

Опытно-экспериментальные наблюдения и анализ данных

Опытно-экспериментальные наблюдения и анализ данных, направленные на выявление такой возможности и были проведены ОАО «Хантымансийскгеофизика» с участием СНИИГиМС геофизической службы Сибирского отделения РАН в ноябре 2001 г. Но выявить ожидаемые эффекты при первичной обработке не удалось. На заключительном этапе анализа, в начале 2003 г, в работе приняли участие сотрудники ИВМ СО РАН, авторы данной статьи.

Были выполнены следующие работы:

1. Проведен анализ исходных данных
2. Создана технология обработки и выявления местоположения поверхностных и глубинных источников
3. Проведена обработка данных с целью выявления источников упругих колебаний
4. Получены анимационные картинки движущихся источников, для снеговых, поверхностных и глубинных волн
5. Проведены модельные исследования и даны рекомендации

Ниже приводится более подробная информация по основным результатам этих работ.

Проведен анализ исходных данных, полученных двумя отрядами: отряд ОАО «Хантымансийскгеофизики» и СНИИГИМС. В результате анализа мы пришли к выводу, что предпочтительными для обработки являются данные отряда ОАО ХМГ. Главным показателем является качество регистрации волн от перфорации. Перед началом обработки было потрачено много времени на уточнение систем наблюдения. Для этого использовались данные перфорации колонны и зарегистрированные воздушные и прямые волны от стационарных и движущихся источников.

Проиллюстрируем рисунками эту вспомогательную, но очень важную часть работы, без которой была невозможна основная обработка.

На рис.1а показаны устье, забой скважины и исходная схема профилей наблюдения отряда ХМГгеофизики. Она включает в себя 4 профиля, образующих два креста. Первый из них расположен северо-восточнее, а второй юго-восточнее забоя скважины. Один из профилей каждого креста ориентирован на забой скважины, а второй ортогонален ему. Минимальное удаление от проекции забоя на поверхность до ближайшего канала составило около 700 м, максимальное около 1500 м. Число регистрирующих каналов на каждом профиле 30, шаг между приборами 25 м.

В процесс анализа сейсмограмм, полученных при перфорации колонны, были забракованы 40 каналов, которые в дальнейшей обработке не участвовали.

На рис.1 б,в приведены два фрагмента сейсмограммы, зарегистрированной от перфорации: с введенной кинематикой (верхний кадр); с кинематикой и корректирующей статикой (нижний кадр). Корректирующая статика и скоростной график, по которому была рассчитана кинематика, использовались в дальнейшей обработке. Следует обратить внимание, что без сейсмограмм, зарегистрировавших перфорацию, дальнейшая обработка была бы практически невозможна.

С использованием этой же сейсмограммы был опробован алгоритм нахождения координат X,Y глубинного источника упругих колебаний.

Модель и алгоритм накопления

Рассматривалась горизонтально-слоистая модель среды. Опорные лучи трассировались с учетом преломления. Промежуточные лучи находились путем интерполяции. Суть алгоритма сводилась к тому, что в области поиска строилась равномерная сетка, и для каждого ее узла рассчитывался параметр когерентности P_j , который будет равен

$$P_j = \frac{\left(\sum_{i=1}^N A(t_{ij}) \right)^2}{N \sum_{i=1}^N A(t_{ij})^2}$$

где N – число приемников, i – номер пункта приема, j – номер узла сетки, t_{ij} – время прихода волны, рассеянной в узле j в пункт приема i , A – амплитуда трассы на соответствующем времени. Время прихода волны зависит от пространственного положения узла сетки и пункта приема и от скоростного графика. Расчет времени пробега велся в горизонтально-слоистой модели.

Для улучшения помехоустойчивости необходимо усреднение показателя по совокупности параллельных годографов, охватывающих некоторый временной интервал. При известной форме сигнала можно построить оптимальный алгоритм усреднения показателя когерентности на интервале длины сигнала. При неизвестной форме, как будет в случае гидроразрыва, субоптимальным вариантом будет усреднение значений показателя когерентности. Усредненный параметр будет меняться от 0 до 1.

В том случае, когда годографы совпадут с направлением осей синфазности волны, будет получен максимум когерентности. В результате расчета показателя когерентности для сейсмограмм от перфорации были получены значения на сетке 32x32 с шагом 5 м. Изображение показателя видим на рис.1г. Как видно, кроме основного максимума амплитуды, который находится вблизи точки перфорации скважины, имеются побочные максимумы, вытянутые в субширотном направлении. Модельные исследования показали, что причиной вытянутости и появления сильных побочных максимумов является большая асимметрия системы наблюдения относительно забоя скважины. Для преодоления этого был разработан более устойчивый алгоритм, позволяющий учесть и уменьшить влияние асимметрии. Для этого вводились фиктивные зеркально-симметричные относительно точки расчета точки наблюдения. Изображение накопленного показателя когерентности, полученного новым алгоритмом, приведено на рис.1д. Хотя изображение не является изометричным, но оно не имеет побочных максимумов, а основной максимум совпадает с забоем скважины, вблизи которого проводилась перфорация. Смещения точек перфорации и точек забоя по осям X,Y отсутствуют.

Выявление поверхностных источников

На некоторых сейсмограммах, когда велась регистрация колебаний в процессе гидроразрыва, были зарегистрированы интенсивные низкочастотные колебания с кажущейся скоростью от 240 м/с до бесконечности. В процессе анализа предстояло изучить эти волны, определить их природу и в дальнейшем учитывать их или исключать из обработки соответствующие сейсмограммы.

В процессе анализа выявлено два стационарных источника. Они дают максимум когерентности при скорости распространения поверхностной волны равной 1530 м/с. Один из источников (по-видимому, двигатели, насосы буровой) расположен юго-восточнее устья скважины, а второй юго-восточнее забоя. Возможно, второй – отражение от мелкого горизонта сигнала первого источника или реальный источник шумов. Со слов одного из участников полевых работ – примерно в этом месте находился движок подзарядки аккумуляторов.

Анализ показал, что наиболее интенсивными оказались помехи от движущегося транспорта. Шумы от них передаются через верхние слои, по воздуху или через снег. Анализ проводился путем расчета в каждой точке поверхности показателя когерентности. Положение аномалий показателя связываются с местоположением источника шумов. Было выявлено два типа движущихся по поверхности источников.

Изображение первого движущегося источника, удаленного примерно на 2 км от центра, позволило сделать вывод о том, что источник перемещается со скоростью около 60 км/час. Судя по скорости и большой интенсивности, источником является движущийся по железной дороге поезд. Априорно о существовании в этом месте железной дороги нам не было известно. Позднее это было подтверждено. При настройке на глубину 2950 м по этим сейсмограммам (с 39 по 41) получаем интенсивное, слегка вытянутое к северу изометричное пятно, которое на предварительном этапе было принято нами за возможный глубинный источник – следствие от гидроразрыва.

После того, как было выяснено, что источником является движущийся объект, эти сейсмограммы были исключены из обработки. Сейчас нам ясно, что интенсивное расплывчатое пятно – это точки отражения от слоистой толщи упругих волн от движущегося поезда.

Второе интегральное изображение источников поверхностных низкоскоростных волн, ($V=240$ м/с), накопленных на сейсмограммах 29, 30, 31 отчетливо вырисовывало линейную траекторию движения источников (вероятно, здесь находится автомобильная дорога и источником звука является движущийся транспорт). Низкая скорость волны видимо объясняется тем, что она распространяется по снегу и слабо затухает. Такой феномен известен из опыта ранее проводимых работ.

Выявление глубинных источников

Работа по выявлению глубинных источников проведена в два этапа. На первом этапе были обработаны сейсмограммы с 23 по 26. Анимированный вывод результатов их обработки был продемонстрирован на НТС «Хантымансийскгеофизики».

На рис.2а показано интегральное изображение источников, накопленное при обработке 23,24,25 и 26 сейсмограмм. Общий интервал регистрации этих сейсмограмм около 400 с. Обработка проводилась с вводом дополнительных симметричных расстановок. Судя по изображению, источники упругих волн концентрируется в субмеридиональной зоне, вытянутой до 60 м от забоя скважины.

На втором этапе была сделана попытка расширить область поиска, включив сейсмограммы 27 и 28, но это дополнительной информации не дало. Сейсмограммы с 29 по 31 и с 39 по 41 обрабатывать смысла не имело, так как уже было сказано, что при их регистрации наблюдались сильные шумы от движущихся источников.

Какие же независимые данные подтверждают правильность результата? Таким подтверждением является сопоставление кривой давления при закачке жидкости при гидроразрыве и интегрального показателя когерентности, рассчитанного с шагом 20 мс. Показатель когерентности свидетельствует или о наличии слабых, но когерентных по направленному годографу колебаний, или о наличии очень сильных поверхностных шумов, порождающих отраженные волны. Сильных поверхностных шумов на этих сейсмограммах нет.

Следует обратить внимание на то, что регистрация упругих колебаний от гидроразрыва началась с 23 сейсмограммы. Время регистрации сейсмограммы составляет 100 с. Таким образом, на первых четырех сейсмограммах охвачен интервал 400 с, т.е. 6 мин. 40 с.

На кривой давления (рис.2в) при закачке жидкости и пропанта видно отчетливое повышение давления в течение первых четырех с половиной минут. Максимальное давление поднялось до 450 ед. (возможно, атмосфер) и после этого резко стало падать, достигнув уровня 280 ед. на времени около 7 мин. (420 с). Таким образом, первые 4 сейсмограммы охватывают интервал с повышенным давлением. Максимум давления на времени 250 с от начала попадает в интервал регистрации 25 сейсмограммы, где отмечено основное событие (наиболее интенсивное на времени 240 с.) и серия более мелких. После этого давление стало резко падать. Начиная с 27 сейсмограммы ведет себя стабильно, что свидетельствует об отсутствии сильного внутреннего напряжения.

Время проявления глубинных событий мы видим только на интегральном графике когерентности (рис.5б) и по накопленным коэффициентам когерентности, изображенным в плане. Но, даже зная время регистрации события или совокупности событий, мы не видим их следов на исходных сейсмограммах. Этот факт, естественно, вызывает сомнения даже после того, как мы вспомним, что накапливание от 90 групп сейсмоприемников увеличит соотношение сигнал/помеха почти на порядок. Оно увеличивается еще и за счет временного окна интегрирования. В какой-то мере возможности для созданной системы накапливания могут помочь оценить результаты моделирования.

На рис.3а показана модельная сейсмограмма, полученная от одного глубинного источника при соотношении сигнал/помеха, равном 5. На рисунке справа эта же сейсмограмма получена при соотношении сигнал/помеха, равном 1. Регулярного волнового поля мы не видим. При таком или более низком соотношении по симметричной 12-лучевой системе наблюдения (рис.3г) были получены изображения симметрично расположенных источников

случайной интенсивности, группирующихся вдоль трех лучей. На рис.3в видим эти изображения, восстановленные без ввода симметричных приемников. Результат позволяет сделать вывод о возможности технологии выделять слабые сигналы на фоне сильных помех.

Результаты работ по новой технологии с симметричной системой наблюдения

На рис.4 приведены исходные и профильтрованные сейсмограммы, полученные по схеме наблюдения, близкой к той, что была предложена (рис.3г). Такая схема была реализована в 2004 году на одном из месторождений. Число регистрируемых каналов 390, при применении 6 приёмных линий (12 лучей). Шаг между пунктами приёма: 50м, максимальное фланговое удаление 1600м. Длина записи сеймостанции 64 сек., шаг дискретизации записи 2 мсек., время регистрации 2 – 4 часа.

Ниже приведены изображения трасс после ввода кинематики и статики. При учете полученной кинематики и статики изображение источника точно совпало с его реальным положением.

На рис.5а показаны накопленные изображения зон гидроразрыва, полученные в разные интервалы времени. Как видно, в период от 0 до 7 сек (рис.5а, первые два кадра) наблюдается слабое изображение в центре. В следующих интервалах изображение зоны развивается в северо-западном направлении.

Геологический анализ поведения нефтеотдачи на соседних скважинах подтвердил правильность результата.

На рис.5б приведены технические графики и график сейсмической активности в пласте. Как видно, основная активность пласта отмечается в интервале 1500 с, то есть 25 минут, когда держится высокое пластовое давление. После его снижения сейсмическая активность пласта находится на уровне фоновой, которую видим до начала подъема давления.

Все приведенные результаты получались на одной плоскости, то есть на горизонтальной плоскости, проходящей через точку инъекции жидкости и пропанта.

В связи с этим возникает вопрос, а возможно ли построение объемной картинки, выявляющей зоны повышенной активности на нескольких уровнях. Для ответа на этот вопрос был проведен эксперимент регистрации энергии, когда фокусировка энергии делается на многих уровнях в интервале от 1600 до 3500 м. График суммарной энергии на каждом уровне приведен на рис.6. Получился довольно интересный рельефный график, интерпретируя который можно сделать следующие выводы.

1) Острый пик в интервале глубины инъекции вызван «свистом», возникающим при прохождении жидкости через перфорационные отверстия. Именно этот источник хорошо выделяется на рис.5а.

Более расплывчатый максимум, который получается, если убрать острый пик кривой, обусловлен интенсивностью шумов в пласте. Она уменьшается почти на порядок при уменьшении глубины и в меньшей степени уменьшается с увеличением глубины. На кривой видим отдельные пики, которые, возможно, обусловлены появлением дополнительной энергии от мощных отражающих горизонтов (например, горизонта Б).

По этому графику лишь в первом приближении можно судить о разрешающей способности метода. Не следует забывать, что график обобщает интенсивность волн на всем пространстве наблюдения. В любом случае, нужно пытаться получать изображения на уровнях выше и ниже основного уровня. Расстояние между уровнями фокусировки зависит от качества основного изображения и чем оно четче, тем меньше может быть шаг и значения уровней. Для данной ситуации могло бы быть 100 м. И если при гидроразрыве пласта проявляется прорыв на более высокий уровень, то он может быть выявлен.

По данной технологии проведены наблюдения в 7 скважинах. К сожалению, качество наблюдений было не всегда хорошим. На одной из скважин вместо перфорации использовалось прожигание отверстий для закачки жидкости. Это не позволяет получать поправки за пункт приема, а, следовательно, и качественное изображение. На некоторых

скважинах наблюдение проводилось на экспериментальных, не опробованных вертикальных группах. В любом случае, получен значительный опыт наблюдений, который лег в основу нового запатентованного метода сейсмических исследований [5]. Некоторые результаты представлены на международных конференциях [7,9] и опубликованы в статьях [8,10].

Заключение

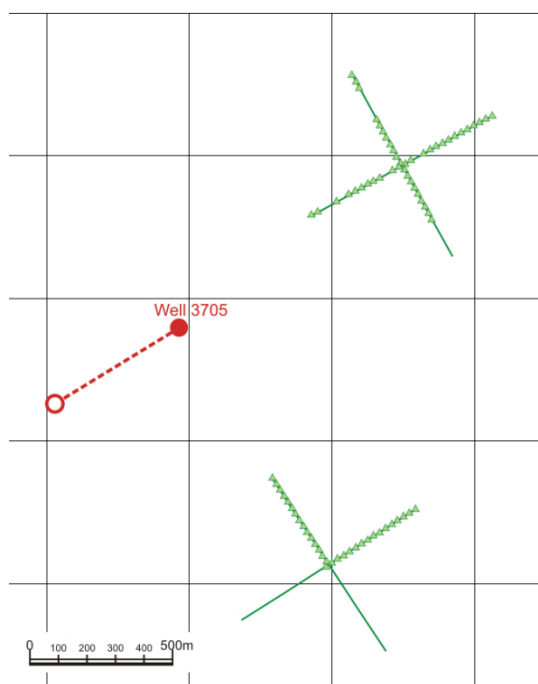
Приведенные в статье результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Впервые показана принципиальная возможность выделения зон гидроразрыва пласта по поверхностным наблюдениям шумов
2. Предложена и опробована технология наблюдения шумов на поверхности
3. Разработаны алгоритмы выделения зон гидроразрыва
4. Технология признана как новый способ сейсморазведки и запатентована [5]
5. Технология имеет большое будущее при изучении процессов, происходящих в пласте при гидроразрыве, и при необходимости проводить более аккуратную эксплуатацию залежей.

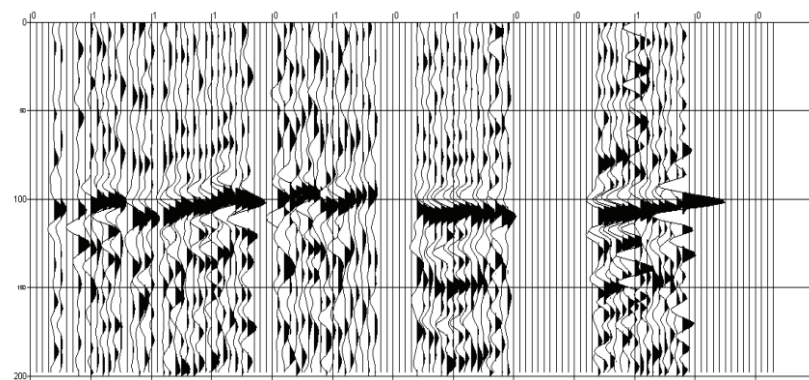
Авторы признательны Воцалевскому З.С., инициировавшему это направление работ, и принимавшему участие в полевых работах 2001 г.

Литература

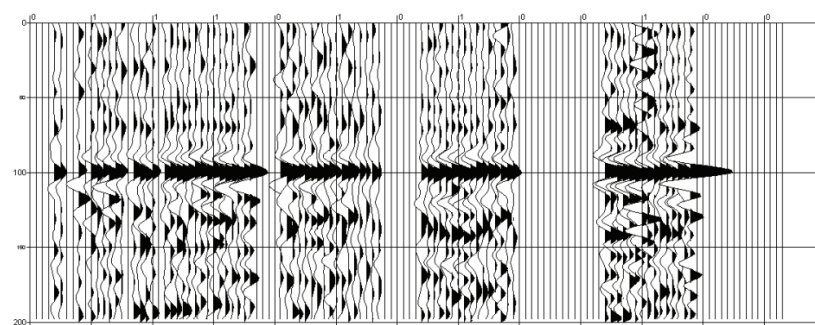
1. Rutledge, J. T. and Phillips, W. S., 2003. Hydraulic stimulation of natural fractures as revealed by induced microearthquakes, Carthage Cotton Valley gas field, east Texas. *Geophysics*, 68.
2. Li, Y., Cheng, H.C., Toksoz, M.N., 1998. Seismic monitoring of the growth of a hydraulic fracture zone at Fenton Hill, New Mexico. *Geophysics*, 63, 1.
3. Block, L.V., Cheng, C.H., Fehler, M.C., and Phillips, W. S., 1994 Seismic imaging using microearthquakes induced by hydraulic fracturing. *Geophysics*, 59, 11.
4. Meadows, M.A. and Winterstein D.F., 1994. Seismic detection of a hydraulic fracture from shear-wave VSP data at Lost Hills Field, California. *Geophysics* 59, 11.
5. Кочнев В.А., Поляков В.С., Гоз И.В., Муртаев И.С., Савин В.Г., Зоммер Б.К. Патент РФ на изобретение №2282876 «Способ сейсмической разведки зон растрескивания горных пород в процессе гидроразрыва»
6. Брыксин И.В., Зоммер Б.К., Кочнев В.А., Поляков В.С., Гоз И.В., Савин В.Г., Опыт регистрации и обработки сейсмических данных в результате гидравлического разрыва пласта. *Геофизика, спец.вып. «55 лет ОАО Хантымансийскгеофизика»*, с.20-22.
7. V.A. Kochnev, V.S. Polyakov, I.V. Goz, I.V. Bryksin, I.S. Murtayev, V.G. Savin, B.K. Zommer. Imaging Hydraulic Fracture Zones from Surface Passive Microseismic Data. EAGE/SEG Research Workshop 2007 "Integrating Geosciences for Fractured Reservoir Description". Perugia, 3-6 Sept. 2007. A38, 5 стр.
8. V.A. Kochnev, V.S. Polyakov, I.V. Goz, I.V. Bryksin, I.S. Murtayev, V.G. Savin, B.K. Zommer. Imaging Hydraulic Fracture Zones from Surface Passive Microseismic Data. *First Break*, vol.25, October 2007, p.77-80.
9. Кочнев В.А., Муртаев И.С., Поляков В.С., Брыксин И.В., Гоз И.В., Савин В.Г., Зоммер Б.К. Опыт регистрации и обработка шумов с целью определения зон гидроразрыва пласта.. *Сб.трудов Межд.конф. геофизиков и геологов, Тюмень, 4-7 декабря 2007 г*



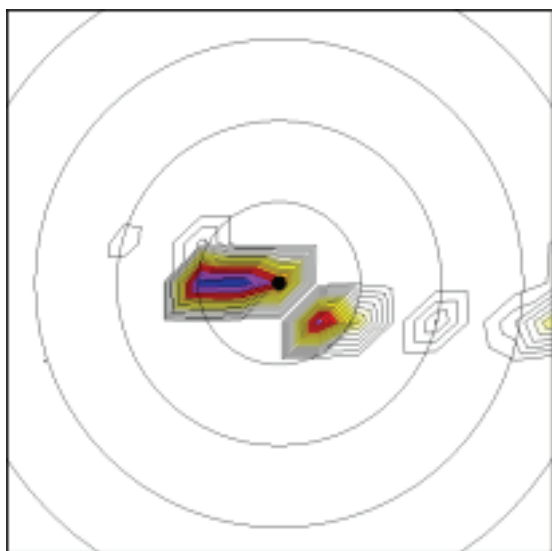
а) Схема наблюдения гидроразрыва на кусте 3705 Восточно-Сибирского месторождения



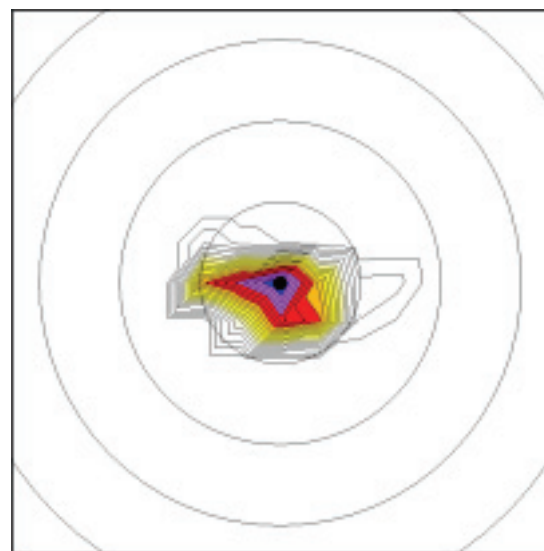
б) Сейсмограмма от перфорации с введенной кинематикой



в) Сейсмограмма от перфорации с введенной кинематикой и статикой

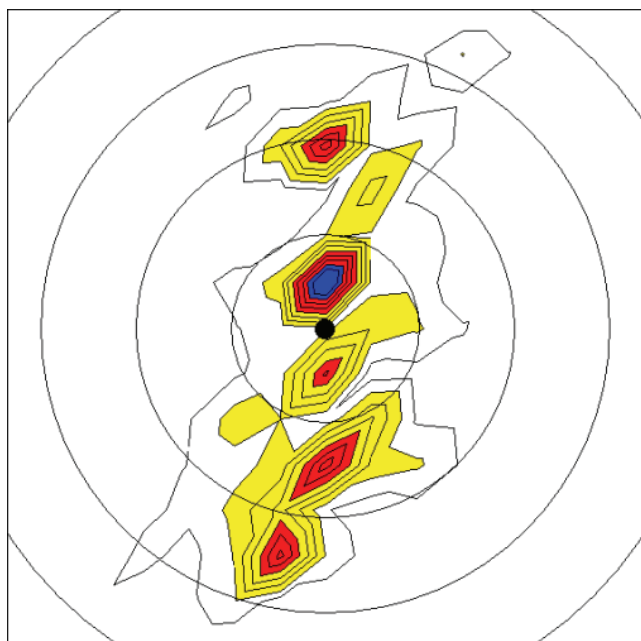


г) Изображение источника от перфорации, восстановленное по сейсмограммам

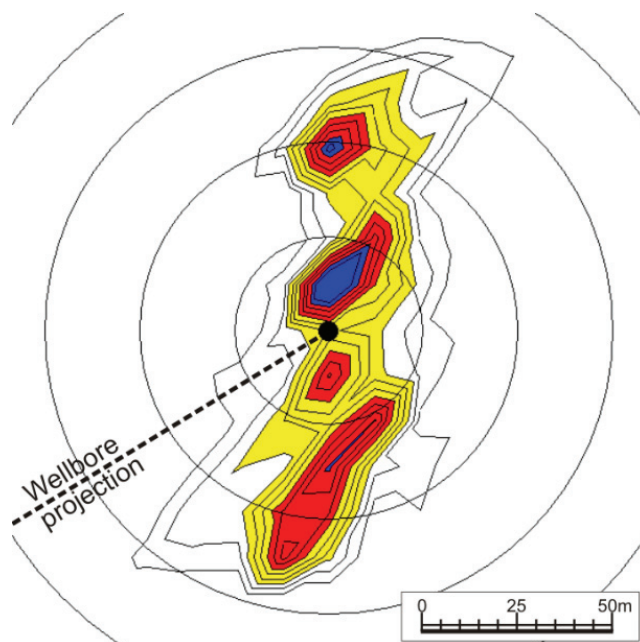


д) Изображение источника от перфорации, восстановленное по сейсмограммам с вводом расстановок симметрии.

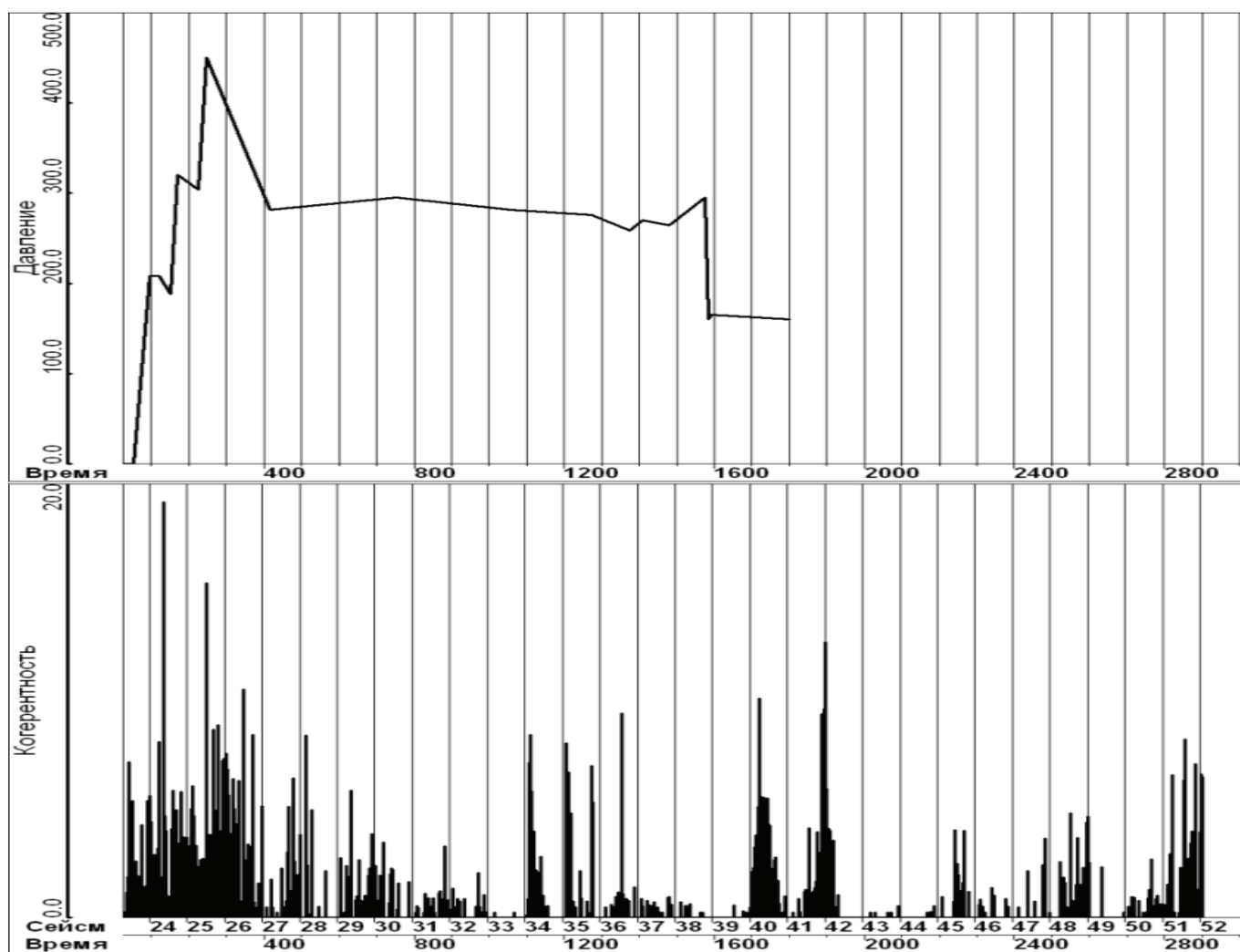
Рис.1



а) Несглаженное изображение выделенных зон гидроразрыва

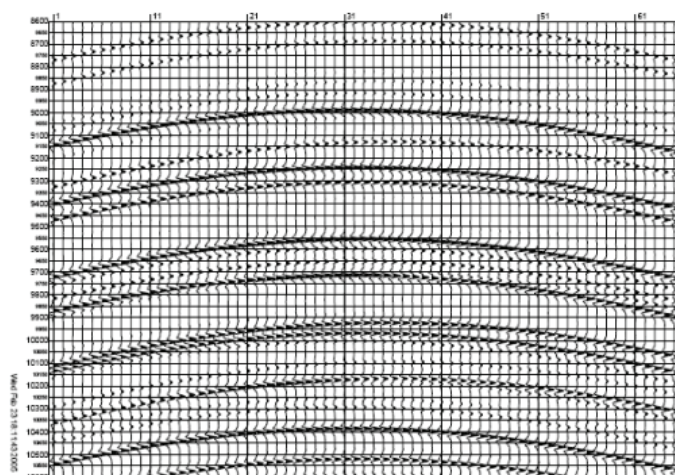


б) Сглаженное изображение выделенных зон гидроразрыва

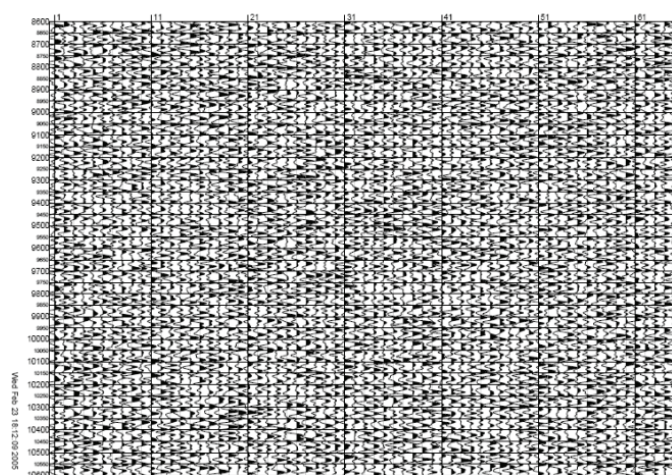


в) Кривые давления и когерентности

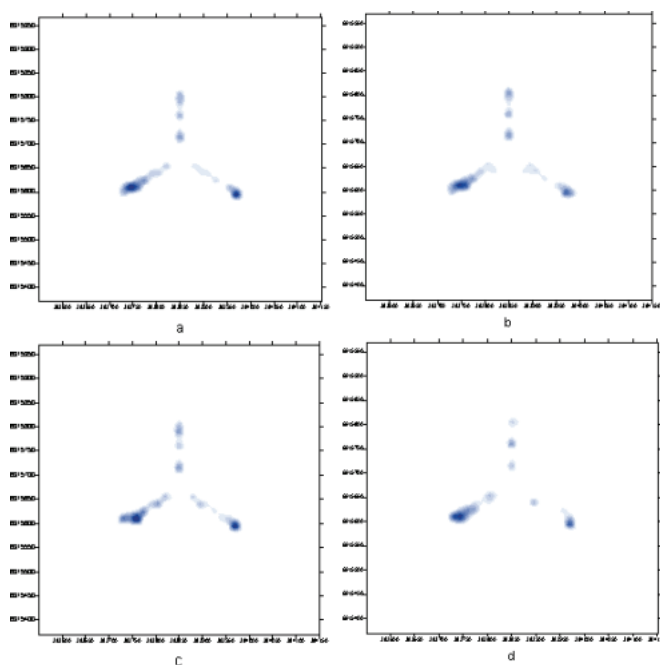
Рис.2



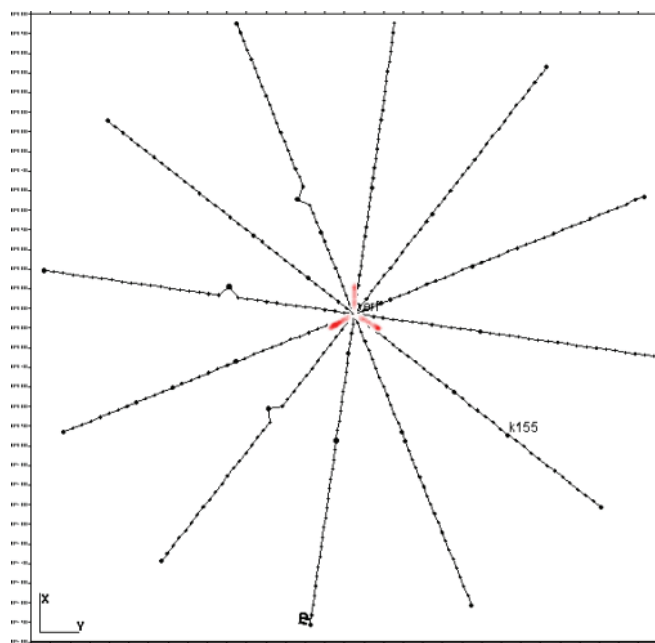
а) Модельные трассы без шума



б) Модельные трассы с шумом



в) Результат фокусировки: а без шумов, б–с шумом $A_c/A_{ш} = 1$, с–с шумом $A_c/A_{ш} = 0.5$, d–с шумом $A_c/A_{ш} = 0.25$



г) Схема 12-лучевой модели наблюдений

Рис.3

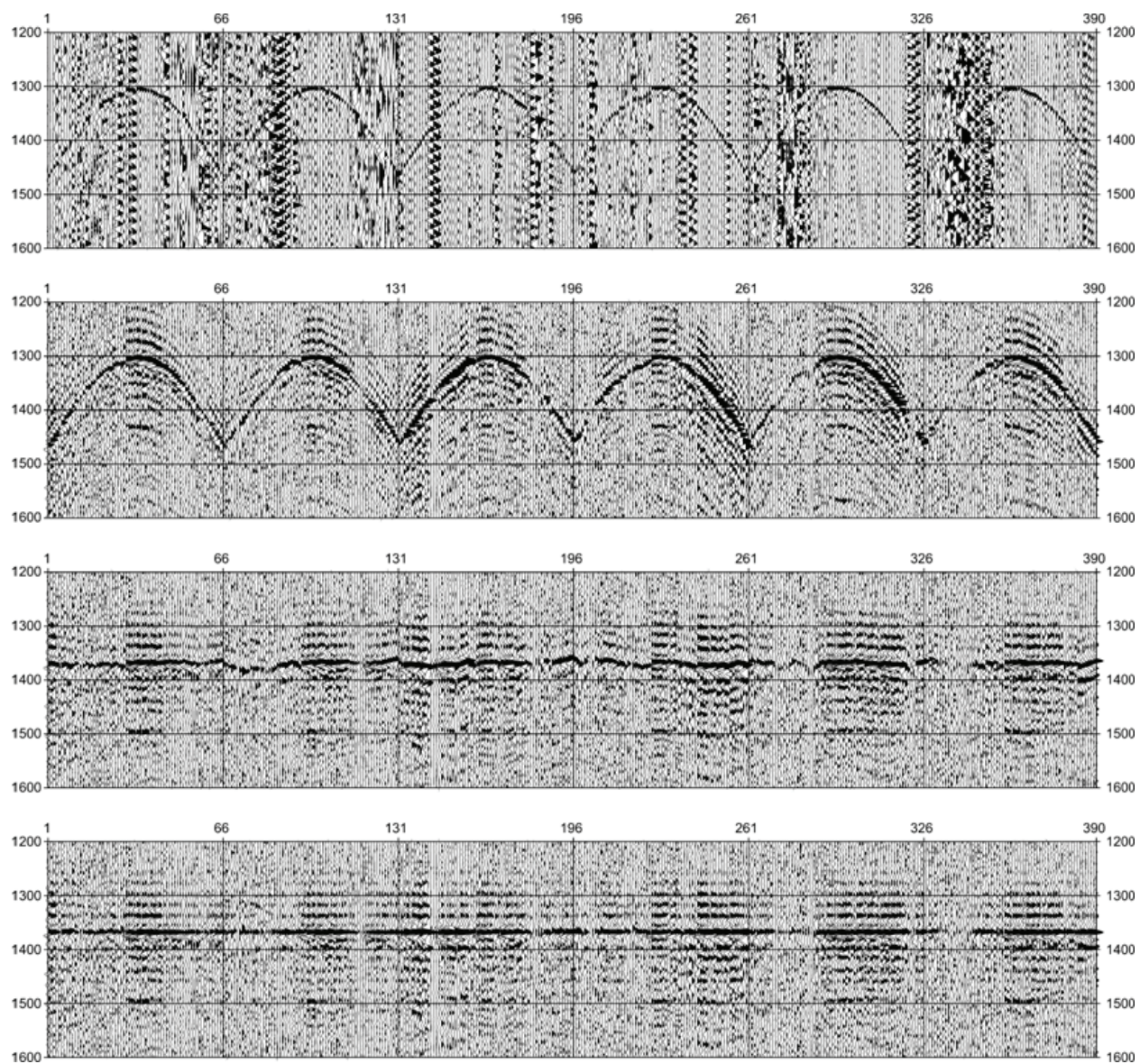
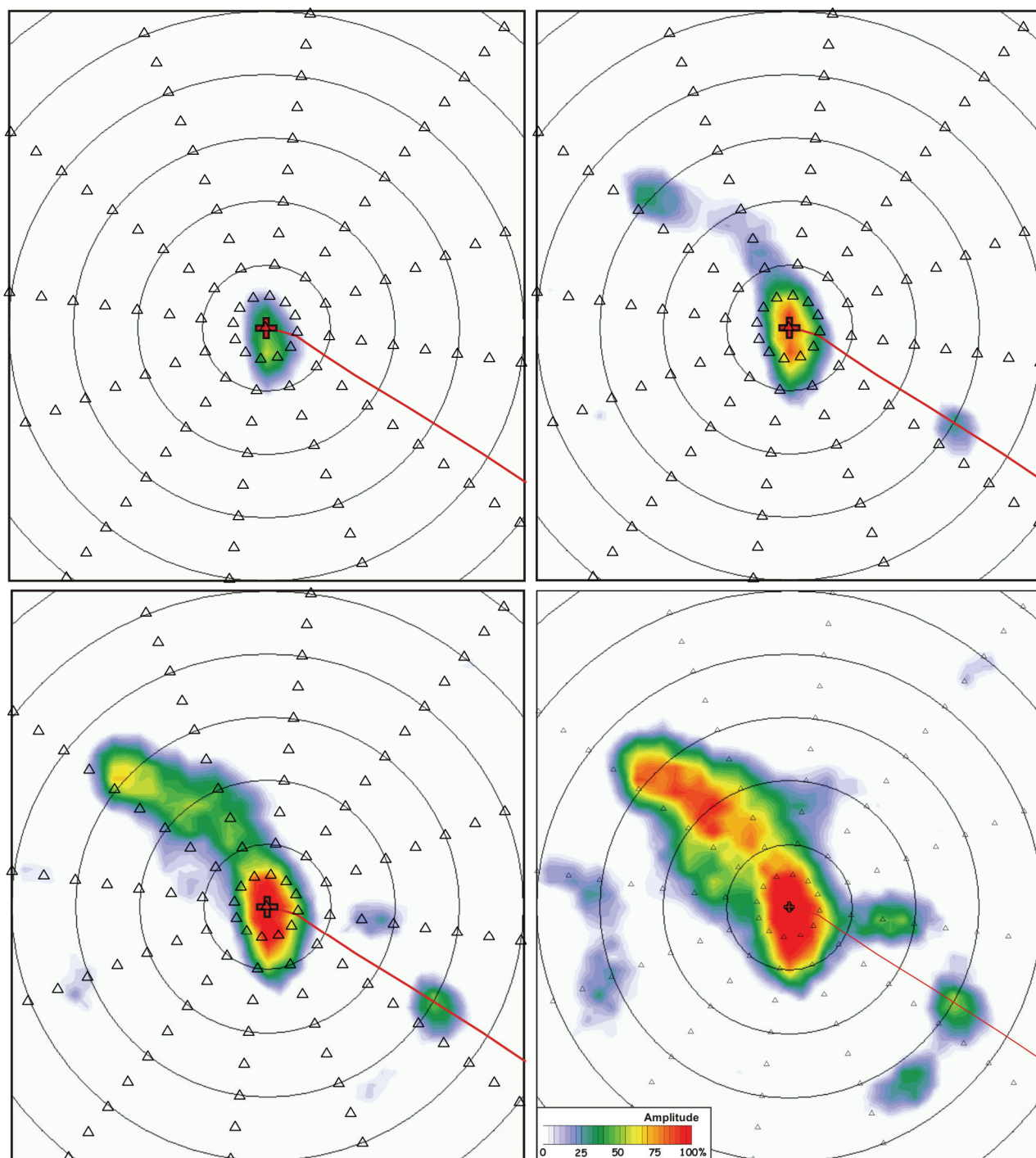
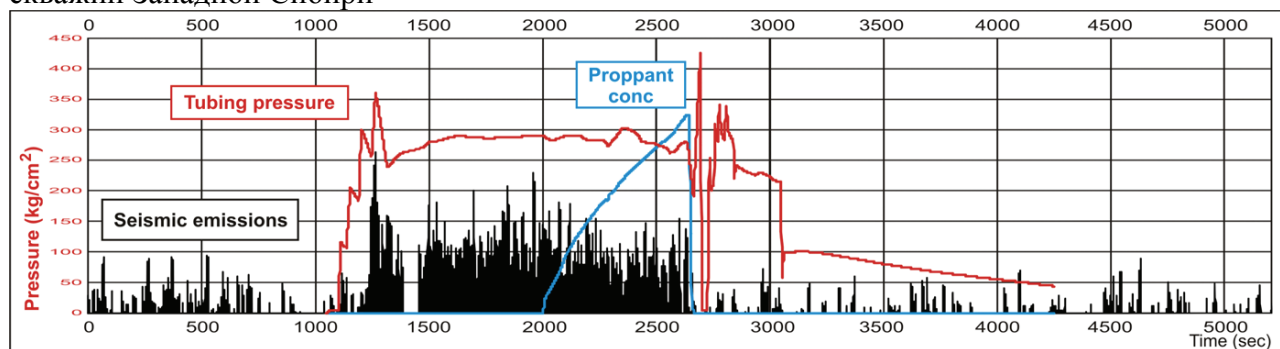


Рис.4 Вид сейсмограмм от перфорации: исходные, после фильтрации, после ввода кинематики, после ввода статики



а) Результат накопления изображения зон гидроразрыва, полученный в 2004 году на одной из скважин Западной Сибири



б) Технологические графики проведения ГРП, совмещённые с выявленной техногенной сейсмической активностью пласта.

Рис. 5



Рис.6 Сопоставление энергии статических волн на уровне пласта с технологическими шумами: а) кривые 2001 г, б) 2004 г, в) 2005 г