

Пассивная Сейсмика

Есть ли будущее у пассивной сейсмологии?

Is there a future for passive seismic?

Peter M. Duncan, из Microseismic Inc, расположенной в Хьюстоне, приводит честную оценку возможностям и трудностям методики пассивной сейсмологии для разведки и добычи углеводородов.

Геофизики на протяжении почти века использовали энергию землетрясений для изучения глубинных структур Земли. Люди, занимающиеся геотермальными ресурсами, десятилетиями использовали звук для обнаружения трещин и

жерл, которые проводят горячие подземные воды и пар. Лишь недавно нефтегазовая индустрия стала использовать пассивную сейсмологию для решения повседневных проблем разведки и добычи. Возобновление интереса к пассивному подходу частично было подогревано началом разведки в более трудных районах, и также современными инициативами 'умное месторождение', когда пассивные измерения позволяют картировать динамические объекты, например, очень интересно раскрытие трещин и передвижение флюидов.

В этой статье я представляю несколько наших опытов с пассивной сейсмологией по различным проектам за последние два года: от структурного картирования до мониторинга гидравлических трещин. Заметьте, что все эти проекты были успешны, даже с технической точки зрения. Здесь я преследую цель помочь широкому пониманию метода и оценить потенциал пассивной сейсмологии.

Что такое пассивная сейсмика?

Прежде всего, давайте уточним, что я понимаю под пассивной сейсмологией. Пассивная сейсмика – это сейсмические исследования, использующие случайные источники. Вместо использования воздушных пушек, вибраторов или динамита, при съемке пассивной сейсмологии просто устанавливается массив приемников и... записывается. Бригада записывает землетрясения и микросейсмы, другие природные и промышленные шумы. Все они полезны для изображения того, что происходит в резервуаре.

Я считаю, что существует два типа пассивных сейсмических съемок: одна служит для создания статичных изображений Земли, почти как обычная 3D сейсмика, а другая служит для картирования динамической активности, происходящей в резервуаре, как 4D сейсмика, но непрерывная, а не эпизодическая.

Структурное картирование

Пассивная сейсмическая томография на проходящих волнах создает 3D структурные изображения, используя наблюдаемые времена пробега сейсмических сигналов, образующихся от микро-землетрясений, возникающих ниже целевого объекта. Разреженный массив независимых сейсмографов устанавливается над объектом. Массив обычно состоит из 20 до 100 станций, каждая из которых записывает выход с трехкомпонентного (3C) геофона. Станции могут функционировать в режиме триггера, записывая только при приходе волны, или непрерывно.

Обычные площади исследования для таких массивов от 300 до 1500 км². 3C приемники довольно часто помещаются в 10 – 30 м ниже поверхности, чтобы исключить влияние шумной поверхности. Станции могут хранить собственные данные, но обычно она связанные с центром обработки с помощью какой-нибудь телеметрии.

После установки приемников съемка продолжается захватыванием сейсмических сигналов, которые прошли целевой объект. Местоположение наблюдаемых микро-землетрясений, при предположении о начальной скоростной модели, определяется по времени и месту с помощью давних методов, основанных на пикировании вступлений фаз P и S волн на каждой станции. После регистрации нескольких волн, процесс прекращается, и считается, что истинное время гипотетических волн известно. Для оценки новой скоростной модели используется инверсия времен пробега. Трехкомпонентная природа наблюдений позволяет оценить распределение Vp и Vs скоростей. Чем больше волн будет записано в данных, тем точнее будет оценка скорости. Процесс продолжается в такой манере, пока не будет достигнуто желаемое разрешение. (Для большей информации о пассивной сейсмике такого рода см. Kapotas et al., *First Break*, **21**, December 2003.)

Съемки такого типа могут продолжаться от 6 до 18 месяцев, чтобы достигнуть приемлемого разрешения. Кто-то может задать вопрос, где и когда такая съемка становится выгодной? Конечно, в равнинных районах более традиционная съемка методом отраженных волн, возможно, является лучшим решением. Но в горных районах, пассивная сейсмика будет тем дешевле, чем больше высота. В районах с чувствительной окружающей средой проведение пассивных измерений с малым воздействием на природу означает проведение съемки, которая в другом случае никогда бы не стала возможной. В высокоразвитых областях также наличие малого воздействия увеличивает вероятность получения разрешения.

Чуть больше года назад MicroSeismic была нанята для картирования площади в Скалистых горах Америки с помощью пассивной сейсмологии. Массив из 20 регистрирующих станций был установлен на площади около 300 км². Массив действовал как 20 независимых триггер-устройств, записывающих землетрясения. Записанные волны были прокоррелированы по времени GMT, записанным приемником GPS в каждой станции. Записывающие устройства были марки RefTek 72s.

Принимая в расчет только волны, которые были зарегистрированы более чем на трех станциях, мы обычно записывали от 5 до 10 волн каждый день. Но при анализе большинство этих волн было отнесено либо к шуму, либо к волнам, возбуждаемым слишком далеко для их использования в томографии. Это сократило нашу регистрацию землетрясений до менее одного в день. Оценка магнитуды

Пассивная Сейсмика

зарегистрированных волн показало, что мы заинтересованы лишь в волнах с $M_L=0.5$. Мы недавно предприняли несколько шагов в попытке снизить порог регистрации, и, значит, увеличить количество зарегистрированных землетрясений. Мы установили приемники в малоглубинные скважины для уменьшения уровня шума. Мы перешли от отдельной регистрации триггер-способом к непрерывной записи, так как было определено, что разные локальные условия около станций сделали тригги-запись неустойчивой. Мы также раздвинули станции дальше друг от друга, чтобы получить большую базу захвата. Эти изменения проявились в увеличении числа записей мощных землетрясений.

Рис. 1 изображает перспективный разрез и глубинный срез по модели скорости волн сжатия (V_p), определенной после 12 месяцев записи и 200 волн. Структура скорости, кажется, отражает геологию, насколько известно по редкой 2D сейсмике на этой площади, но разрешение такого картирования еще далеко от приемлемого, итак, съемка продолжается.

Картирование изменений

Во втором типе пассивной сейсмики, часто называемой микросейсмическим мониторингом, микросейсмическая активность сама по себе является целью съемки. Картирование распределения источников сейсмического шума внутри и около резервуара, мы надеемся, скажет что-то о динамической активности в резервуаре, есть ли активные разломы, трещины или какие-то формы перемещения флюида.

Одно из наиболее общих применений микросейсмического мониторинга – мониторинг гидравлических трещин. Обычно, один набор от восьми до двенадцати приемников закладывается в скважине на уровне резервуара, или чуть выше, рядом со скважиной для ГРП. Далее регистрируются первые вступления прямых волн, образующихся при дроблении пород. Затем используются довольно стандартные алгоритмы определения местоположения землетрясений для определения гипоцентров наблюдаемых волн. Картирование местоположений источников волн отражает развитие трещин. Часто эти результаты представлены в виде клипов, хорошо отображающих динамическую природу процесса. Похожие внутрискважинные наблюдения используются для картирования сейсмической активности, относящейся к инъекции пара, инъекции CO_2 и сжатия резервуара (для примера см. Wilson, S., et al., *First Break*, October 2004).

Колебания, связанные с активностью в резервуаре, обычно очень малы, с магнитудами (M_L) в диапазоне от -1 до -3. Необходимость искать и пикировать времена прихода сигналов от этих колебаний как отдельные p и s фазы, чтобы рассчитать местоположение гипоцентра с помощью стандартной методологии, накладывает ограничения на использование геофонов, помещенных в скважину достаточно близко, для достижения достаточного соотношения сигнал/шум. Необходимость в скважине для наблюдений и границы области наблюдений (обычно 1000 м и меньше) могут ограничить применение этой методики для ряда проектов.

Наша патентованная методика пассивной сейсмической эмиссионной томографии является другим подходом к микросейсмическому мониторингу. Она применяется для набора геофонов, установленных на поверхности. Обычный набор состоит из 40 до 100 станций, распределенных по нескольким км². Производим последовательную установку на всех интересующих нас точках, и получается 3D карта эмиссионной энергии. Эта карта отражает почти ту же самую информацию, что и места расположения гипоцентров, полученных из скважинных измерений. Использование этого метода может предоставить преимущества в экономике и логистике по сравнению со скважинными измерениями.

Мониторинг испытания потока

Одно из наших первых предприятий в области эмиссионной томографии была съемка для Burlington Resources на нижних склонах холмов в Западной Канаде. Нашей задачей был мониторинг трещин и испытания потока добычи в газовой скважине. Глубина песчаного коллектора была примерно 3200 м. Набор из 9 трехкомпонентных геофонов был установлен на площади 30 км², целевой объект был в центре площади, самый дальний приемник был в 3 км от скважины. Сейсмический приемник Kinometrics K2 был помещен на каждой станции для непрерывной записи во время работы скважины. Данные были сохранены на флэш-памяти в каждой станции. Синхронизация по времени была достигнута по GPS, извлекающим сигнал времени из заголовков данных. Период записи составлял примерно 15 дней, пока проводились ГРП и испытания в скважине. Станции должны были автономно включаться и выключаться, и флэш-память заменялась по заполнению, что было довольно затруднительно в поле, так как доступ к станциям был сильно ограничен. Погода, трудности доступа и влияние дикой природы, в особенности одного голодного медведя, привело к тому, что запись производилась по крайней мере без одной, а то и четырех станций.

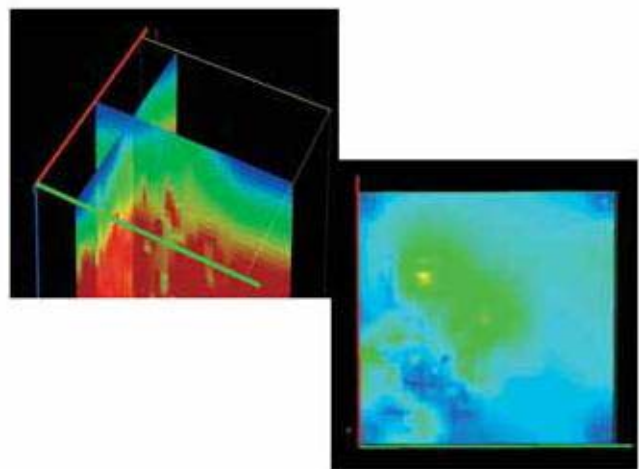


Рис. 1 Скоростная (V_p) модель, определенная по пассивной сейсмике. Глубинный срез 60 x 60 км на глубине 2 км. Основание зеленой части 6 км. Скорости изменяются от 1800 м/с (голубой) до 6500 м/с (красный)

Пассивная Сейсмика

На рис. 2 представлен контурный срез на уровне резервуара по полю сейсмической энергии, наблюдаемой сразу после открытия заслонки для тестирования потока. Интенсивность потока была порядка млн.куб.футов/день. Данные представляют собой сумму энергии за период 50 секунд. Сейсмические данные были профильтрованы до суммирования в диапазоне 0-10 Гц. Протяженная аномалия в СВ-ЮЗ направлении совпадает с серией волн в этом местоположении (см. рис. 3). Заметьте, что яркое пятно в центре массива совпадает с точкой перфорации скважины. Честно говоря, мы были удивлены, даже скептически относились к тому, что данные наблюдаемые структуры относятся к потоку в скважине. Кажется изумительным то, что эффект от открытия заслонки может распространяться на несколько километров от скважины за несколько секунд. Мы убедились в реальности увиденного, учтя совпадение по времени между открытием заслонки и возникновением волн и тот факт, что направление трещин совпадает с направлением максимального напряжения в скважине.

Гидравлические трещины

Предыдущий пример, хоть и очень обнадеживающий, не предоставил нам доказательств, что мы записали реальные волны. По контракту с Burlington мы продолжили исследования для мониторинга гидравлических трещин в горизонтальной скважине, одновременно проводился мониторинг ГРП обычным способом в скважине. Массив состоял из 100 ЗС геофонов, установленных по площади 2 км x 3 км со скважиной в центре. Непрерывная сейсмическая регистрация в виде последовательных записей длиной в одну минуту была произведена приемниками SerCEL 408. Запись началась за 24 часа до

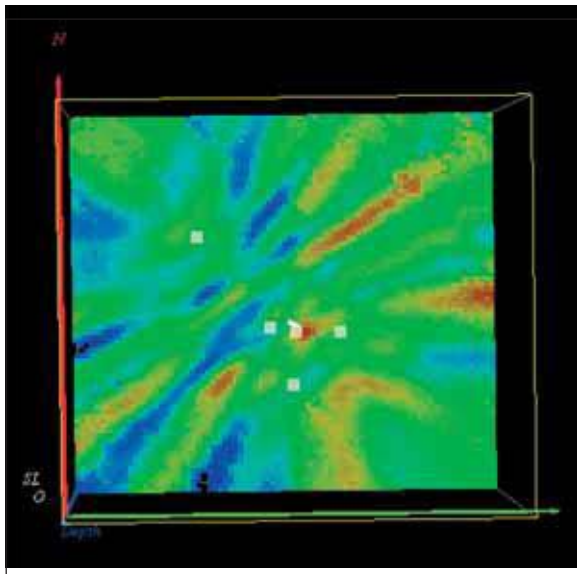


Рис. 2 Срез на глубине 3200 м по 50 с разрезу пассивной сейсмической эмиссионной томографии при испытании потока. Белые квадраты обозначают сейсмические станции. Скважина для испытаний располагается в центре массива приемников. Карта 6 км x 6 км. Яркие цвета обозначают области с повышенной эмиссионной энергией.

начала ГРП и продолжалась около 24 часов после его прекращения. Распределение сейсмической энергии в одноминутном временном разрезе было посчитано для всех восьми часов ГРП и для отдельных интервалов до и после ГРП.

На рис. 4 показан глубинный срез на уровне резервуара 2300 м для одной из минут во время ГРП. Мы интерпретируем такое распределение энергии как результат шума от растрескивания пород под приложенным давлением. Мы скорее картируем накопленный сигнал от некоторого неизвестного числа волн от трещин, которые возникают за интервал суммирования, чем картируем отдельные гипоцентры волн. Рисунок показывает, что энергия распределена вдоль направления, перпендикулярного скважине, и, значит, по направлению максимального напряжения, как и ожидалось. Также существует несколько индикаторов сопряженной

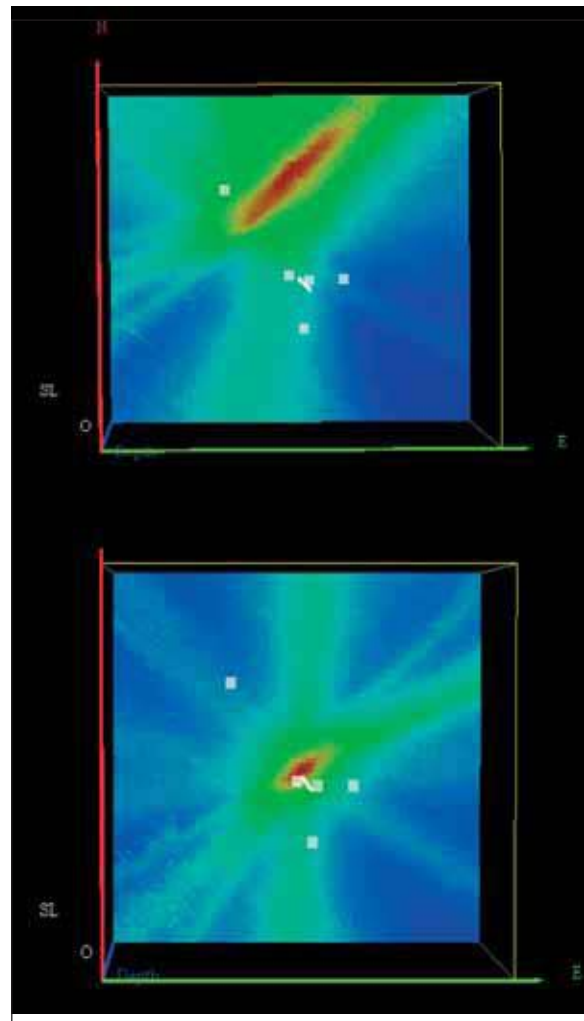


Рис. 3 Прямое моделирование разрезов пассивной сейсмической эмиссионной томографии, соответствующее данным на рис. 2. Аномалия на верхнем рисунке вызвана 3 волнами на глубине резервуара, распределенными вдоль длины красного контура. Аномалия на нижнем рисунке вызвана отдельной волной от точки перфорации в скважине.

Пассивная Сейсмика

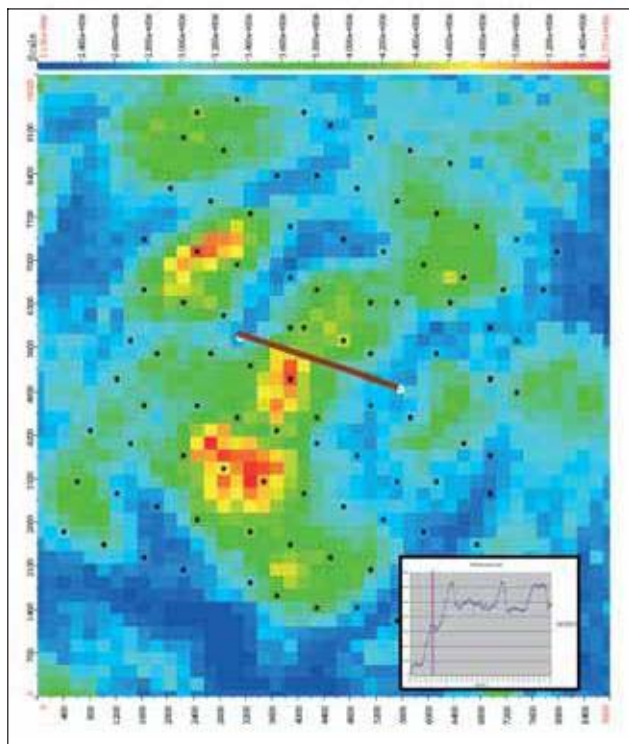


Рис. 4 Глубинный срез на уровне резервуара через куб пассивной сейсмической эмиссионной томографии, полученный из одномоментных наблюдений по симуляции гидравлических трещин в горизонтальной скважине. Черные точки обозначают местоположение станций наблюдения. Коричневая линия с белыми точками отображает положение горизонтальной части скважины. Более яркие цвета обозначают области с повышенной энергией акустической эмиссии. Вставка отображает историю давления при ГРП, красной линией обозначено время суммирования. Расстояние вдоль осей в футах. Распределение энергии согласуется с трещинами в двух направлениях, одно, параллельное к направлению максимального напряжения (то есть перпендикулярно к скважине), и сопряженный набор справа от этого направления.

системы трещин справа от этого направления. Эти результаты хорошо согласуются с полученными результатами скважинных наблюдений, что дает больше уверенности в этом поверхностном подходе к микросейсмическому мониторингу.

Некоторый шум это просто шум

Чтобы не создало впечатление, что всегда все идет по плану, позвольте мне предьявить еще одну историю. Заданием было провести мониторинг газового месторождения на юго-западе Колорадо для очерчивания контуров месторождения, или хотя бы границ дренажа по распределению шума, производимого при добыче газа из резервуара. Во время мониторинга

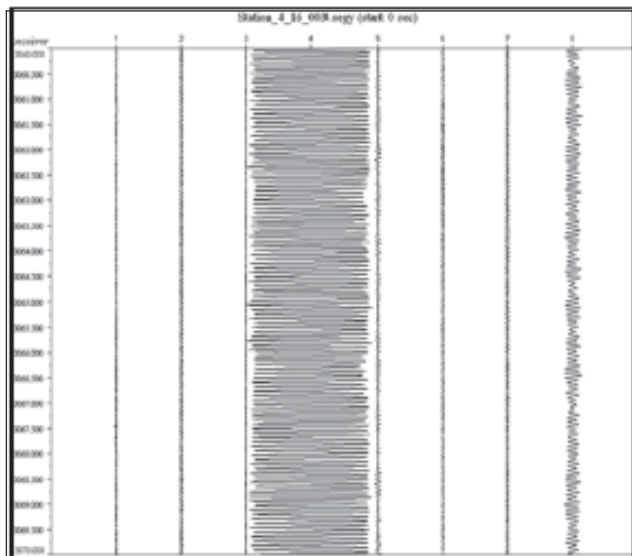


Рис. 5 10 с запись горизонтальной компоненты в направлении восток-запад сейсмического сигнала, записанного на восьми станциях по проекту оконтуривания месторождения. Главный «звон» на 12 Гц вероятно относится к компрессорам, работающим в поле.

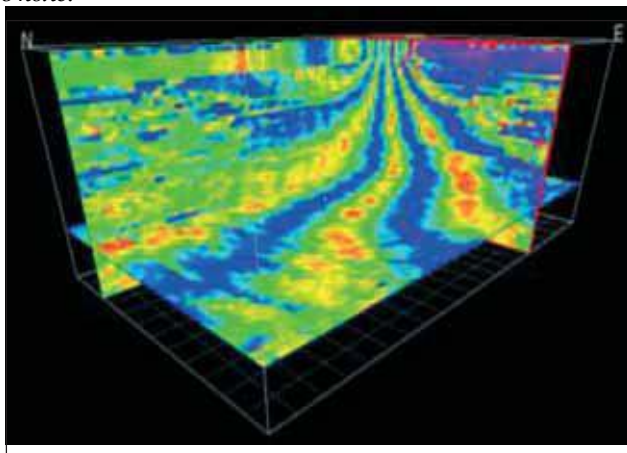


Рис. 6 Перспективный вид суммированного разреза эмиссионной энергии данных, показанных на рис. 5, показывающий вид узкополосного шума на разрезе.

несколько добывающих скважин были остановлены и затем открыты заново для воздействия на давление в резервуаре. Глубина резервуара составляла около 2700 м. Была проведена эмиссионная томография с помощью набора из девяти 3С геофонов, покрывающих площадь около 15 км². В течение двух недель велась непрерывная запись с использованием аппаратуры Kinometrics K2.

На рис. 5 показана 10 секундная запись из этого набора данных. Сразу становится очевидным, что в записи на станции 4 преобладает шум, , повсеместно распространенный сигнал с частотой 12 Hz с несколькими гармониками был обнаружен на всех станциях. В итоге к источнику шума был отнесен к компрессорам,

Пассивная Сейсмика

используемых в поле при добычи газа. Их было несколько на всей площади, станция 4 находилась ближе всего к компрессору. Мы не обнаружили другой тактики для исключения шума, кроме выключения компрессоров. Когда мы исключили станцию 4 из суммирования, стал доминировать шум на станции 8 и так далее со всеми станциями (см. рис. 6). Сильная амплитуда гармоники 12 Гц сделала бесполезными атаки на шум с помощью фильтров. Также нам не удалось убрать реверберацию с помощью деконволюции. Кажется, что мы зарегистрировали шум от компрессора, который стал резонировать в низкоскоростном приповерхностном слое. Нашим лучшим решением было поместить геофоны в малоглубинные скважины, пробуренные ниже этого низкоскоростного слоя. Мы протестировали эту теорию в одной 4-метровой малоглубинной скважине, пробуренной ручным способом. Сигнал от этой закопанной станции был лучше относительно 12 Гц шума. Более глубокая скважина принесла бы лучшие результаты. К сожалению, на тот момент у нас не было разрешения на бурение скважин в этом проекте.

Заключение

Наш опыт за последние два года по нескольким различным применениям пассивной сейсмики был очень обнадеживающим, но не без разочарований. Рекомендуется использовать больше, а не меньше геофонов для усиления сигнала и подавления шума. Для избегания поверхностного шума полезно помещать геофоны ниже слоя выветривания. Как можно ожидать, успех в области пассивных измерений зависит от соотношения сигнал/шум. Если кому-то удачно удастся усилить сигнал и подавить шум, то метод дает очень удовлетворяющие результаты.

Я вижу наиболее интересное будущее для пассивной сейсмики в области мониторинга динамических процессов в реальном времени: мониторинг ГРП, картирование активных разломов и прослеживание инъекций флюидов. Если использовать поверхностные наблюдения или помещать геофоны в скважину ближе к резервуару, мы практически помещаем стетоскоп на грудь земли и слушаем. Ограничивающим фактором в настоящее время является то, что у нас не так много опыта в том, как интерпретировать эти звуки. Это сложная задача для будущего пассивной сейсмики.