

Изучение активных разломов в городских условиях Пекина с помощью пассивной сейсморазведки, выполненной приборами SmartSolo

■ Лю Ланьбо, University of Geosciences, г. Пекин

Наиболее серьезные геотехнические проблемы порождаются наличием разломов. Обнаружение разломов (особенно активных разломов) является первым шагом к проведению дальнейших инженерных исследований. В данной работе мы исследовали правдоподобность изображения зон разломов пассивными сейсморазведочными исследованиями.

Испытательный полигон находится в северном пригороде Пекина, вдоль южного берега реки Вэньюхэ, протекающей с северо-запада на юго-восток, где пересекается разлом Хуанчжуан-Гаолиин (HGF), активный в голоцене. Полученные результаты хорошо согласуются с сейсморазведочными исследованиями, проведенными с использованием активных источников возбуждения сейсмического сигнала и существующими скважинными данными.

Несомненно, метод активной высокоразрешающей сейсморазведки отраженных волн является надежным методом для выявления разломов. Недостатком является его высокая стоимость и невозможность использования взрывного источника в городских условиях. В отличие от этого, пассивные сейсморазведочные работы гораздо более дешевые в выполнении, позволяют так же эффективно локализовать разлом. Хотя разрешение изображения, полученного средствами активной сейсморазведки существенно выше, наш пассивный сейсмический эксперимент на участке реки Вэньюхэ показал, что и этот метод эффективен, особенно там, где стратиграфия значительно различается по разные стороны разлома.

Введение

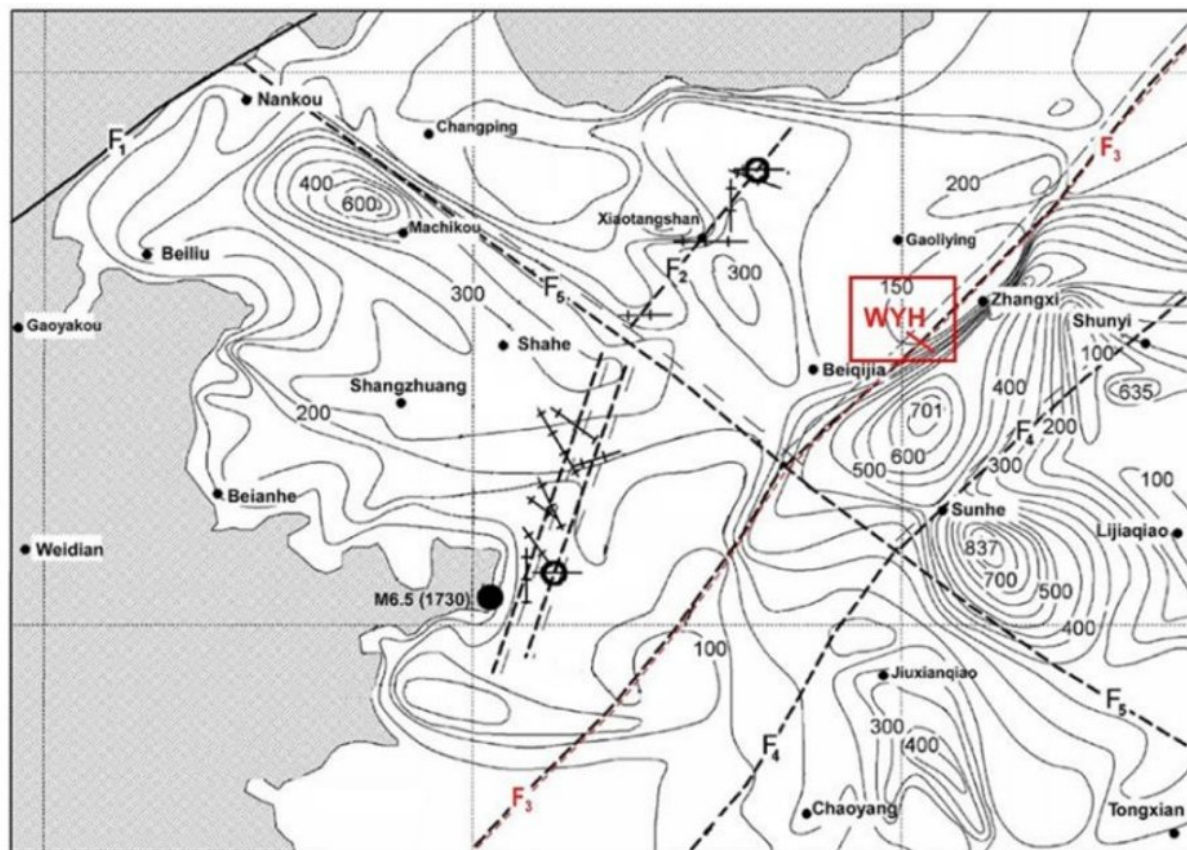
Активный разлом всегда провоцирует проблемы устойчивости грунтов, что важно при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений. Активные разломы, возникшие в четвертичном периоде активны и в настоящее время. С ними связывается высокая угроза новых подвижек грунтов, так как они являются границами между тектоническими блоками, продолжающими свою активность. Точное обнаружение таких разломов, особенно на урбанизированных территориях, имеет важное значение для городского планирования и снижения сейсмической опасности. Сейсмический метод является одним из важнейших геофизических методов во всех видах подземных исследований и обнаружения. Сейсморазведка благодаря своей высокой точности, разрешенности и глубинности является основным методом получения детального геологического разреза.

В статье представлена информация о состоянии HGF, полученная с помощью как

пассивных сейсмических наблюдений, так и традиционной активной сейсморазведкой. Геологическая информация контролируется скважинными данными по разные стороны разлома. Даны особенности разломов, полученные с помощью сейсмической интерферометрии с окружающим шумом при помощи численного моделирования с использованием теории изображений дневного света. Эти результаты приводят нас к выводу, что HGF проявляется как как нормальный активный разлом на участке реки Вэньюхэ.

Геологическая обстановка и значение Хуанчжуан-Гаолиин разлома

Пекин находится в Северо-Китайской тектонической провинции, характеризующейся формированием тектонических элементов, как результат сжатия с востока на северо-восток в следствии индоевразийской коллизии, а так же субдукции Тихоокеанской и Филиппинской морских плит. Правостороннее смещение удара, с севера на северо-восток создает активные



▲ Рис. 1. Геологическая карта, показывающая окрестности НЭ Пекина. В Хуанчжуан-Gaoliying вина (ХГФ) помечен как F3 со сломанной красной линией. Сейсморазведка на участке реки Вэньхуэ (WYH), обсуждаемая в данной работе, обозначается красной полосой в красной рамке, пересекающей разлом F3 (модифицированный на основе He et al., 2009).
 Условные обозначения: 1 - Позднечетвертичный активный разлом; 2-Раннечетвертичный разлом; 3-погребенный разлом; 4-Четвертичные отложения; 5-Раннемиоценовые коренные породы; 6-Четвертичная линия изопоха в метрах; 7 - линии геофизических исследований; 8-расположение скважины; 9-Эпицентр исторического землетрясения 1730 М6.5. F1: Разлом Нанькоу; F2: Разлом Дунбэйван-Сяотаншань; F3: разлом Хуанчжуан-Гаолиин; F4: разлом Лянсян-Шуньхэ; F5: разлом Нанькоу-Сунхэ. **WYH** - это область исследования, описанная в этой статье.

разломы, разделяющие блоки. Присутствует один значительный разлом иного - северо-западного направления - разлом Нанькоу-Сунхэ (Рис.1). Разлом Хуанчжуан-Гаолинь (HGF, F3 на Рис. 1) является западной окраиной Пекинского рифтового грабена, образовавшегося в третичное время и простирающийся примерно на 130 км в направлении ЮВ-СЗ.

В целом, HGF представляет собой погребенный разлом, покрытый четвертичными отложениями. Разлом был особенно активен в голоценовое время.

Это преимущественно нормальный разлом с правосторонним компонентом. Угол падения составляет 55°-75° на юго-восток. По данным глубинного каротажа, мощность четвертичных отложений составляет около 460 м в северо-западном блоке HGF, и может достигать 1080 м в юго-восточном блоке в районе реки Вэньхуэ (Рис. 1). С начала 1990-х годов наблюдается оседание грунта вдоль северного участка HGF, проявляющееся образованием заметных трещин грунта. Из-за неравномерного проседания по разные стороны

разлома, асфальтированные дороги, секущие HGF, должны регулярно ремонтироваться. Предыдущие геологические и геофизические работы, особенно в северном Пекине, значительно улучшили понимание активных особенностей HGF и поведения грунтов.

В последние несколько десятилетий сейсмическая активность в исследуемом районе в непосредственной близости от HGF относительно низкая. Последним значительным землетрясением в районе Пекина является «Событие №1730» с магнитудой 6.5 баллов, примерно в 10 км к западу от HGF.

Полевые сейсмические наблюдения на HGF

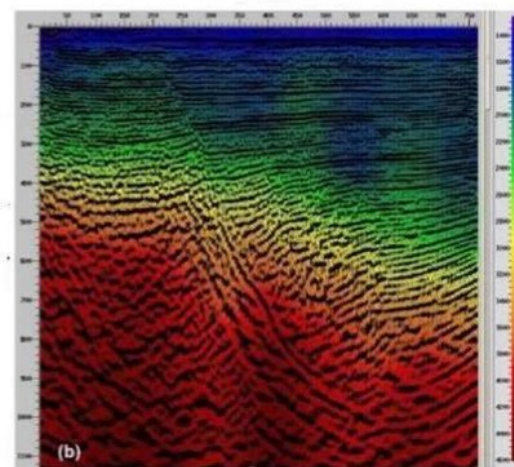
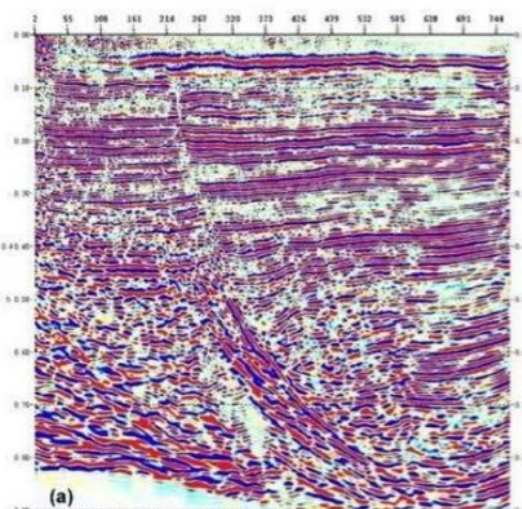
Пассивные сейсмические исследования принимают постоянно существующий окружающий шум в качестве естественных источников, беспорядочно распределенных внутри и на поверхности земли. Анализ шума позволяет оценить свойства горных пород. Такая технология проста и экономична в исполнении, не требует большого объема оборудования и использования дополнительных сейсмоисточников. Недостатками пассивных исследований является сложная обработка и длительное время наблюдения. В то же время, данная статья показывает, что по пассивным сейсмическим данным можно получить информацию, хорошо картирующуюся с активными сейсмическими работами.

Сейсморазведка АКТИВНОГО источника.

Активная сейсморазведка в данном районе была проведена в сентябре 2010 года. На этом участке было установлено, что глубина залегания грунтовых вод составляет около 6 м, что является благоприятным условием для активного



▲ Рис. 2. Район исследований Вэньюэхэ, Пекин.
* Красная пунктирная линия - Хуанчжуан-Гаоляйн разлом (HGF);
* ASLV – линия сейсмического профиля 2010 г.;
* TT54, TT-59 и TT-61 – геотермальные скважины



▲ Рис. 3. Сейсмический разрез по линии ASLV
(a) – до миграции,
(b) – глубинная миграция

сейсмического отражения сейсмического сигнала. Общая длина профиля составила 1,5 км (рис. 2), расстояние между геофонами - 4 м. Шаг ОГТ - 2 метра. Собственная частота вертикального геофона - 60 Гц, пункты приема устанавливались на 0,3 м ниже поверхности земли для достижения устойчивого сигнала. Шаг дискретизации - 1 мс.

В качестве сейсмического источника использовался падающий груз. Двойное накопление позволяло получать хороший сигнал. На участках ухудшения данных использовалось четыре накопления. Регистрация велась сразу по всей расстановке одновременно. 16-кратный профиль ОГТ показан на Рис. 3а.

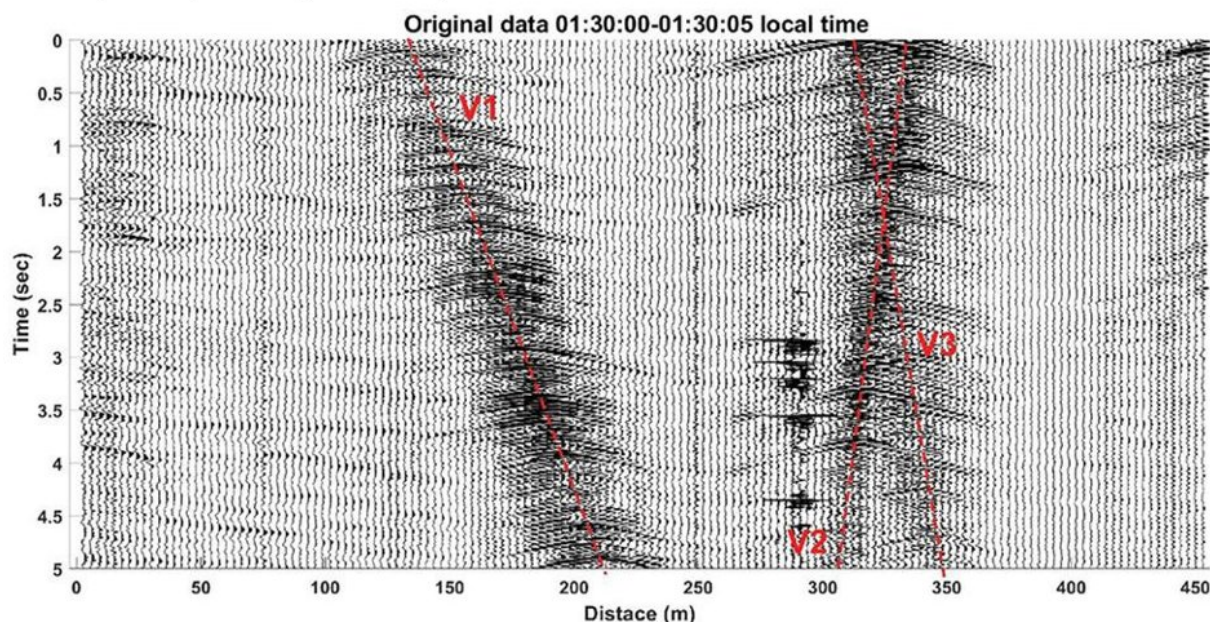
ПАССИВНАЯ сейсморазведка с использованием ВЕРТИКАЛЬНЫХ сенсорных датчиков SMARTSOLO

Пассивная сейсморазведка была проведена субпараллельно линии исследования ASLV на участке реки Вэньюхэ (Рис. 2) в августе 2018 г. Были развернуты

два типа короткопериодных сейсмических датчиков. Сначала вдоль южного берега реки Вэньюхэ было установлено 200 единиц датчиков SmartSolo чувствительностью 5 Гц (рис. 4). Исходная точка пассивных сейсмических наблюдений была определена на юго-восточном конце линии съемки, на углу пересечения дорог вдоль берега реки и той, что пересекает мост (рис. 2). Расстояние между пунктами приема SmartSolo 5 Гц составляло 3 м. Общая длина профиля составила $(200-1) \times 3 = 597$ м. Основываясь на предыдущих доступных данных активной сейсморазведки, разлом Хуанчжуан - Гаолиин пересекает пассивную сейсмическую линию в том месте, где находится датчик SmartSolo № 89. При этом расстояние от расчетной плоскости разлома до начала массива составляет около 270 м.

Частота дискретизации сбора данных SmartSolo составляет 1 мс, а максимальное время записи регистрации SmartSolo было более 3 ч. Интервал дискретизации

▼ Рис. 4. Фрагмент 5-секундных исходных данных вертикального компонента SmartSolo для временного окна с 1:30:00 до 1:30:05 по местному времени. Вибрации, вызванные тремя проезжающими транспортными средствами, могут быть четко идентифицированы при кажущихся скоростях 59,8 км/ч, -23,8 км/ч и 29,5 км/ч для транспортных средств V1, V2 и V3 соответственно.



времени в 1 мс означает, что наибольшая частота допустимой регистрации поступления энергии составляет до 500 Гц. Однако основные частотные составляющие городских шумов значительно ниже. Из-за полевых условий геофонная линия были установлены вдоль южной стороны местной дороги, проходящей по южному берегу реки Вэньхэ (рис. 5 и 6). Движение на дороге представляет собой источник частого сильного когерентного шума, наблюдаемого на записях. Некоторые пассивные сейсмические записи содержат достаточно сильные и когерентные шумы, создаваемые проезжающими по дороге транспортными средствами (рис. 4). Однако, наш подход к анализу записи позволяет и эти локальные высокоэнергетические когерентные шумы использовать с точки зрения извлечения глубинной информации.

Пассивная сейсморазведка с использованием сейсмометров EPS2

По той же линии исследования, параллельно приборам SmartSolo, было размещено 24 единицы 3-компонентного сейсмометра EPS2, которые участвовали в записи пассивного сейсмического шума, для получения дополнительной. Расстояние между сейсмометрами EPS2 составило 24 м, причем первый датчик SmartSolo и первый датчик EPS2 расположены в начале линии наблюдения на юго-восточном конце линии съемки. На каждые восемь датчиков SmartSolo был установлен один датчик EPS2. Общая длина линии размещения EPS2 составила $(24-1) \times 24 = 552$ м. HGF пересекает массив EPS2 рядом с датчиком № 12. Частота дискретизации для датчиков EPS2 составляла $dt = 5$ мс. Максимальное время регистрации EPS2 составляет 3 799 058 сек, около 5 ч 16 мин.

Алгоритмы обработки данных

Сейсмическая интерферометрия (SI) с помощью кросс-корреляции (cross-correlation, CC) и автокорреляции (auto-correlation, AC) являются основным математическим алгоритмом для получения структурной информации из окружающего шума. Корреляции окружающих сейсмических вибраций широко и эффективно используются для восстановления импульсных реакций между двумя пассивными приемниками, как если бы на одном из них был установлен источник. Многочисленные исследования с использованием сейсмической интерферометрии окружающего шума показали, что данный метод прост, надежен и генерирует большое количество сигнатурных сигналов.

Клербут (1968) первым предложил концепцию «дневного изображения» (daylight imaging). Часть данных «дневного изображения» может быть определена как сейсмические данные, записанные на поверхности земли, но генерируемые случайно распределенными источниками в земле. Время каждого события источника «дневного изображения» представляет собой случайный временной ряд. Сейсмический дневной свет подразумевает, что существует много сейсмических источников, и их совокупная интенсивность так же ярка, как дневной свет. Сейсмическая визуализация «дневного изображения» происходит в результате корреляции одного сейсмического события в различных точках на дневной поверхности. Перекрестная корреляция двух событий в поверхностных точках А и В дает отклик, эквивалентный отклику отражения в точке В, генерируемому источником в А.

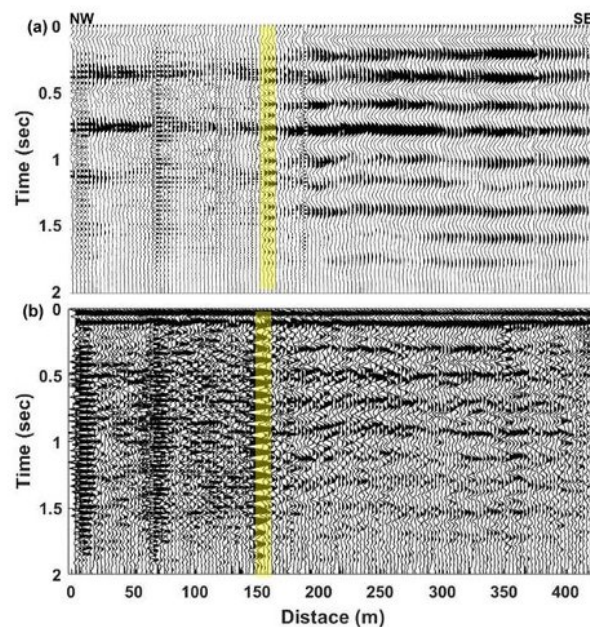
Клербут (1968) также продемонстрировал, что одна сторона автокорреляции акустической сейсмограммы, записан-

ной поверхностным приемником от источника плоской волны на глубине, является откликом отражения источника поверхностной плоской волны, записанного тем же приемником. Вапенаар и др. (2004) доказали, что результаты исследований Клербута (1968) могут быть обобщены и для трехмерной неоднородной среды.

Используя данный подход проводилась обработка в рамках данного исследования. Были выполнены автокорреляционные преобразования для зарегистрированных данных окружающего шума по вертикальной составляющей зарегистрированной датчиками SmartSolo. Чтобы воспользоваться преимуществами многокомпонентности современных сейсмометров, Hobiger et al. (2014) ввели одностанционную методику кросс-корреляции (cross-correlation SC) обработки окружающего сейсмического шума и сравнили ее результаты с установленными методами кросс-корреляции (CC) и автокорреляции (AC). По сути, SC - это корреляция двух различных компонентов одного трехкомпонентного сейсмического датчика. Учитывая, что для каждого сейсмометра доступны три компонентные записи, есть еще 3 комбинации SC рядом с 3 комбинациями AC. Мы используем этот метод для обработки 3х-компонентных данных окружающего шума, записанных сейсмометрами EPS2.

Результаты обработки и интерпретации

На рис. 6а показан результат автокорреляции (AC) данных, полученных вертикальными датчиками SmartSolo в течение одного часа. В качестве эталона и перекрестной проверки на рис. 6б показана эмпирическая функция Грина отражения с нулевым смещением, получен-



▲ Рис. 6. Изображения сейсмической интерферометрии с использованием данных SmartSolo. (а) Автокорреляция одночасовых данных окружающего шума с 2-секундным временным окном; (б) эмпирическая функция Грина, полученная путем взятия секундной производной по времени сложенной автокорреляции. *Прим. Желтая полоса показывает расположение основной зоны разлома.

ная с помощью вторичной производной по времени сложенной автокорреляции. Без какой-либо предварительной обработки, такой как фильтрация, результаты автокорреляции определенно содержат влияние поверхностных волн, которое выражается в виде доминирующих ревербераций 5 Гц (Рис. 6а). Однако, как это ни парадоксально, оба графика на рис. 6 показывают значительную разницу на левой и правой сторонах разлома. Слева от HGF (обозначенного вертикальной желтой полосой на Рис. 6), видна четкая отражающая граница примерно на 0,38 с. Если взять существующую стратиграфическую информацию, предоставленную журналами скважин, то глубина залегания коренных пород 460 м, что позволяет оценить скорость 2420м/с. Это хорошо согласуется с

Рис. 7. Результаты автокорреляции (AC) NS, EW и вертикальных компонентов (верхний ряд) и одностанционной кросс-корреляции (SC) NS-EW, NS-vertical и EW-vertical компонентов данных окружающего шума EPS2. Желтая полоска отмечает расположение основной зоны разлома.

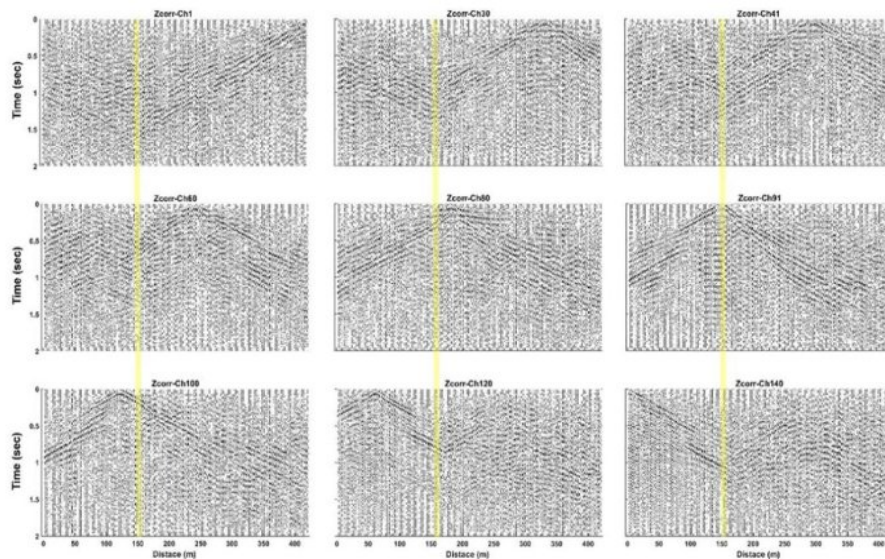
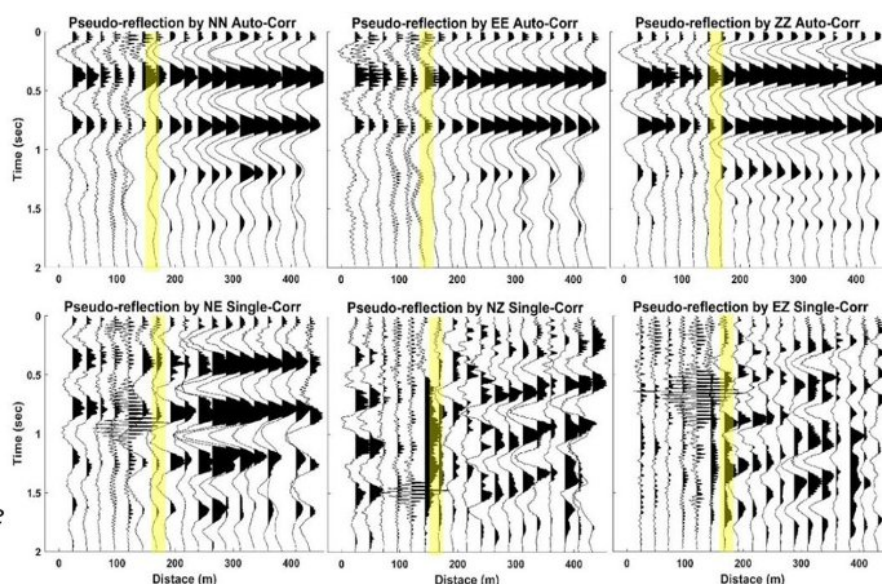


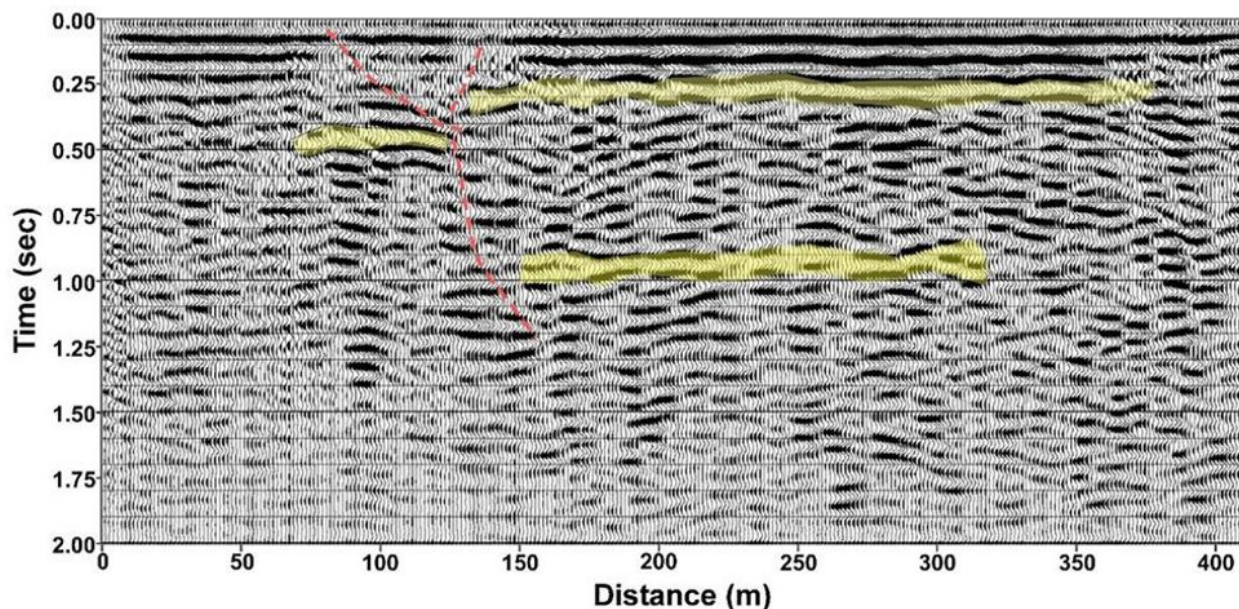
Рис. 8. Примеры результата мультисмещенной кросс-корреляции на основе данных вертикального компонента окружающего шума SmartSolo 1-h. Расположение виртуального источника указывается номерами каналов над каждой панелью.

активным сейсмическим профилированием (рис. 4b). Сильные высокоэнергетические отражения на 0,76, 1,14 и 1,52 с, вероятно, кратные волны от границы 0,38 с.

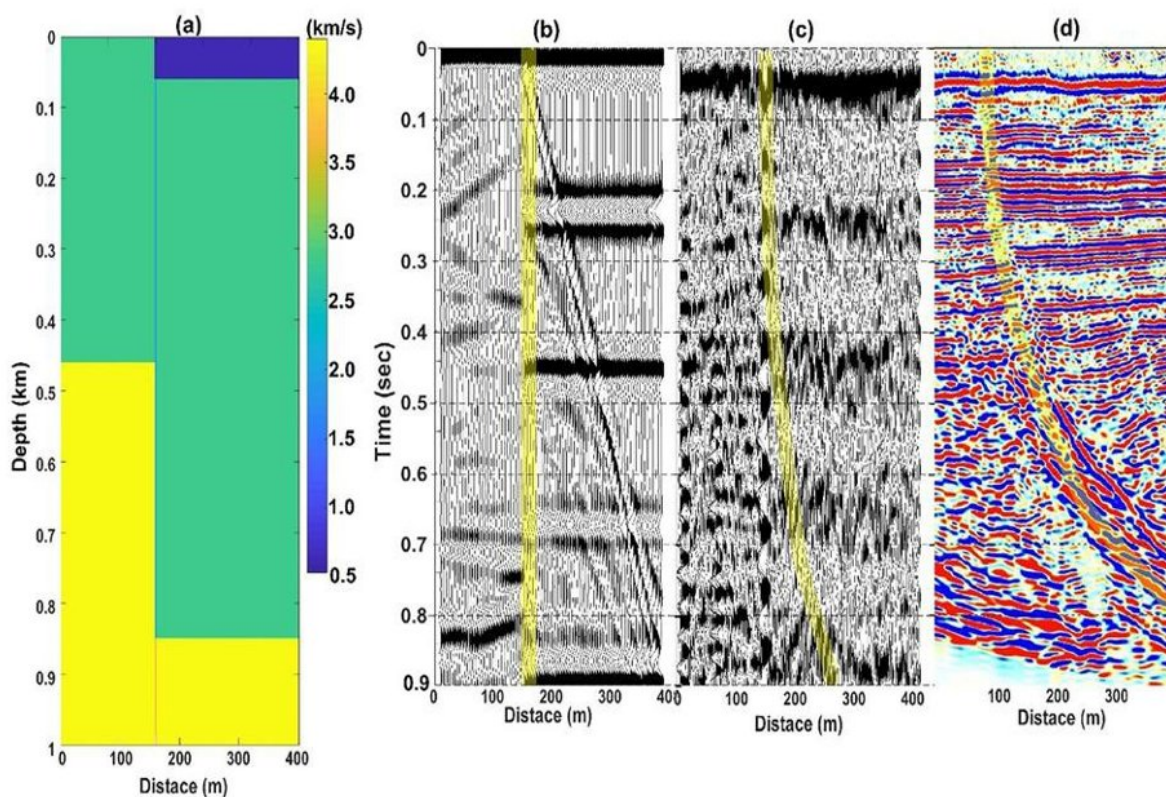
На правой стороне разлома HGF видна сильная реверберация, происходящая с периодом 0,2 с (Рис. 6а). Возможно, причина в том, что энергия сейсмических волн воспроизводится в молодом осадочном слое, образовавшемся в голоценовое время и обладающем гораздо меньшей сейсмической скоростью. Если принять это как разумную гипотезу и с помощью резонансной теории связать ее, то можно оценить толщину этого

молодого слоя примерно в 40 м: характеристики которого довольно близки к тем, что были определены по сейсмическим данным профиля ОГТ.

На Рис. 9 приводится 10-тикратный временной разрез с использованием результата кросс-корреляции на основе одночасовых данных вертикальной компоненты окружающего шума, зарегистрированного датчиками SmartSolo. Непрерывность когерентных фаз прерывается на 100-150 м по горизонтали. Разрез существенно информативнее, чем результаты автокорреляции, показанные на рис. 6.



▲ Рис. 9. 10-тикратный разрез нормального перемещения (NMO) с использованием результата мультисмещенной кросс-корреляции на основе одноканальных данных вертикального компонента окружающего шума SmartSolo.



▲ Рис. 10.

- (a) Упрощенная концептуальная модель нормального разлома;
- (b) результат численного моделирования волнового поля, генерируемого источником плоской волны за счет импульса 15 Гц, падающего с поверхности;
- (c) эмпирическая функция Грина по второй производной сложенной автокорреляции 1-часовых данных окружающего шума, записанных массивом SmartSolo;
- (d) волновое поле активной сейсморазведки (см. также рис. 4a).

Для проверки корреляции окружающего данных пассивных наблюдений было проведено численное моделирование синтетического временного разреза. Использовался метод конечно-разностной временной области (FDTD) с использованием плоской волны в сочетании с импульсным источником (вейвлет Рикера) для имитации падения дневного света с поверхности (Клаербот, 1968). Исходная частота вейвлета Рикера составляет 10 Гц. Эта простая концептуальная модель (рис. 10а) имеет глубину коренной породы 460 м с левой стороны и 850 м с правой стороны вертикального разлома соответственно. Кроме того, на правой стороне разлома имеется свежесасыпанный грунт толщиной 60 метров. Материал зоны разлома представляет собой низкоскоростную зону с 70% скоростей пласта. На рис. 10 сравниваются поля синтетического моделирования (рис. 10b), автокорреляция, сгенерированная эмпирическими результатами функции Грина с использованием записи окружающего шума SmartSolo (рис. 10c), и наблюдаемый профиль активного источника (рис. 10d). Глубинное положение основных отражателей по обе стороны разлома находится в общем согласии и проявляется последовательно на всех профилях (рис. 10b–d). Для синтетического профиля хорошо видна дифракция от разлома на каждой границе раздела (рис. 10b).

Заключение

Несомненно, качество изображения пассивной съемки (рис. 10c) ниже, чем результаты активной сейсморазведки (рис. 10d), полученные на том же участке. Тем не менее, мы хотим отметить, что все результаты Smart Solo основаны только на одном часе наблюдения. Будущие

пассивные сейсморазведочные исследования с более длительным временем записи, более плотным расположением точек наблюдения, а так же переход к площадным исследованиям являются возможным инструментом исследования разломных зон.