

**Наносейсмический мониторинг ликвидирует пробел между микросейсмической сетью наблюдений и пассивной сейсморазведкой. Nanoseismic monitoring fills the gap between microseismic networks and passive seismic**

Manfred Joswig\* вводит концепцию наносейсмического мониторинга как третьего метода (микросейсмические сети и пассивная сейсморазведка являются двумя остальными) для записи сигналов образования трещин верхней коры или в поверхностном слое, и для расположения их в пространстве и времени. Первые результаты мониторинга афтершоков с низким соотношением сигнал-шум (SNR) для контроля за ядерными вооружениями демонстрируют сам метод и его потенциал.

**М**ониторинг сейсмических афтершоков на площади исследования 1000 км<sup>2</sup> является ключевым методом исследований для запланированных инспекций на местах (OSI) организации по выполнению договора о всеобъемлющем запрещении испытаний ядерного оружия (CTBTO) при поиске потенциальных, ядерных подземных взрывов (Linkl, Zucca et al., 1996). Инспекции будут производиться спустя недели после подозрительных событий, и ожидаемые афтершоки уже будут редкими и слабыми, если вообще будут. Таким образом, политические требования - это порог полноты  $M_L -2.0$  для мониторинга сейсмического сигнала, который преобразуется в сейсмограммы с низким SNR при любых условиях шума на области исследований.

Геофизика получает обильную информацию от мониторинга процессов трещинообразования, например глобальные исследования землетрясений дают представление о границах плитовой тектоники, региональные и локальные исследования помогают численно оценить сейсмическую опасность, и определить зоны Бенъофа в погружающихся плитах. Станции, расположенные в скважинах вблизи источника, помогают картировать рост трещин при гидроразрыве, а ультразвуковые, пьезоприемники помогают выделять разрушение материала при испытаниях без разрушения образца. Общим для всех этих приложений является то, что достаточный уровень SNR в зарегистрированных сейсмограммах позволяет

однозначно определить фазу вступления, вслед за чем используется нелинейный итерационный подход Гейгера для расчета гипоцентра. На рис. 1 приводится пример мониторинга гидроразрыва, и показаны примеры сейсмограмм с достаточным соотношением SNR. В таблице 1 обобщаются типичные характеристики микросейсмических сетей наблюдения, например согласно Lee and Stewart (1981), тогда как детали инверсии Гейгера можно найти во многих учебниках сейсмологии, например Lay and Wallace (1995). Если процессы с источнике становятся малы, тогда расстояния для мониторинга должны сократиться, соответственно. Частотный диапазон регистрируемого сигнала будет, соответственно, до десятков кГц для акустического излучения, и сотен кГц для неразрушающих тестов.

Необходимость в скважинных станциях при мониторинге гидроразрыва является очевидным примером ограничений микросейсмических сетей наблюдения, что стало мотивом к поиску возможных альтернатив. Пассивная сейсморазведка - новая возникающая методика, которая дает шанс для записи процесса гидроразрыва с наземных станций. Это требует большего числа станций, что обычно достигается путем двойного использования 4D сейсморазведки на специально оборудованном нефтяном месторождении. На рис. 2 приводится пример из работы Kochnev et al. (2007), тогда как

## Методика увеличения эффективности

в таблице 1 обобщаются соответствующие свойства. Наиболее важным ограничением является статистическое описание высвобождения энергии образования трещин, т.е. не будет доступна информация по единичным событиям.

## Наносейсмический мониторинг

Другой важной альтернативой, представленной здесь, является наносейсмический мониторинг, свойства которого показаны в Таблице 1. Как и пассивная сейсмика, он может разрешать волны в обстановке с гораздо меньшим SNR чем при развертывании микросейсмических сетей; как последний, он помогает выделять отдельные волны в которых отсутствует

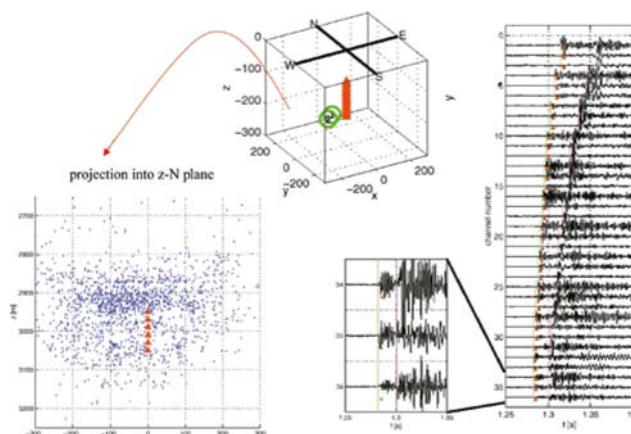


Рисунок 1 Микросейсмическая сеть наблюдений проводит мониторинг сигналов гидроразрыва на Ekofisk (компиляция из работ Oye и Roth, 2001; 2003). Несмотря на необычное расположение станций ВСП, приложение несет основные свойства микросейсмических сетей, которые обрабатывают сигналы станции с достаточным SNR для определения фаз вступления и анализа поляризации.

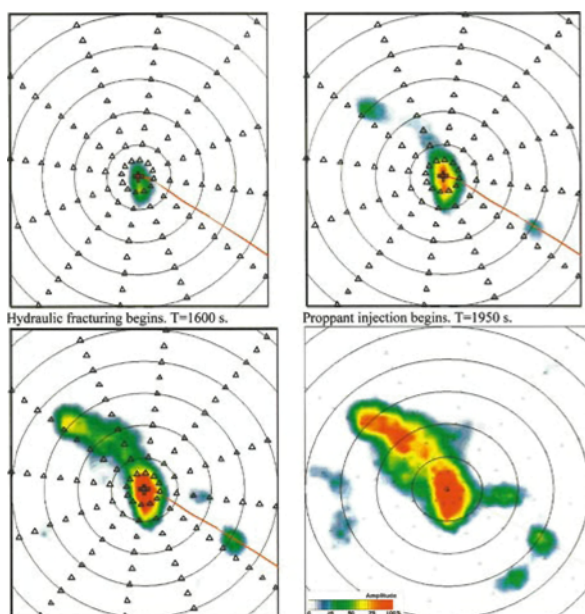


Рисунок 2 Пассивная сейсморазведка проводит мониторинг гидроразрыва на 2445 м от поверхности (по Kochnev, 2007). Отметьте, что цветовая легенда для масштабируемой 'амплитуды', относящаяся к высвобождению относительной энергии образования трещин за единицу времени. Отдельные сейсмограммы событий не могут наблюдаться для записей не поверхности.

определение тензора моментов  $M$  для разрешения ориентации трещин и режимов доминирующих сил. Необходимость в наносейсмическом мониторинге возросла ввиду требований OSI для СТВО при котором надо обнаружить волны  $M_L -2.0$  в радиусе поиска  $1000 \text{ km}^2$ , при том, что должна быть обеспечена доставка 10 членов партии, работающих в поле в течение нескольких недель. План работ включает обработку в реальном времени и потенциальное направление дальнейших инспектирующих команд, например радионуклидной или визуальной инспекции. Таким образом, здесь будет представлен наносейсмический мониторинг вместе с примерами, которые были получены во время учений DE04 группы СТВО в 2004 г.

Однако наносейсмический мониторинг, который действует подобно сейсмическому «микроскопу со средним увеличением» с ранее недостижимой чувствительностью, дает много новых шансов для разрешения фоновых процессов трещинообразования. Wust-Bloch и Joswig (2006) получили идентификацию потенциальных провалов грунта на Мертвом море, Hage и Joswig (2008) сообщают об улучшенном разрешении сейсмичности в период между взрывами в Vogtland, Чешская Республика, а Walter и Joswig (2008), в следующем выпуске *First Break*, описывают начинающееся раскрытие трещин в медленнодвигающемся, глинистом оползне во время сильных дождей в Vorarlberg, Австрия.

DE04 для СТВО было проведено на военном полигоне в Stupava, Словакия (Рис. 3). Его целью было определение расстояний, на которых можно обнаружить слабые афтершоки на фоне сейсмического шума. Целевой источник OSI афтершоков от подземного взрыва был имитирован серией малых взрывов с использованием 75, 150, 200, 400, 475, и 600 г взрывчатых веществ, соответственно. Профили единичных, трехкомпонентных сейсмоприемников (3C) были размечены на расстоянии 500 м один от другого. Три небольших группы, также называемые станциями сейсонавигации (SNS) были помещены на расстояния 1.0, 1.5, и 2.5 км от точки взрыва. Каждая SNS включает восьмиканальное устройство регистрации, в центре, 3C сейсмоприемники и трехдолную расстановку вертикальных датчиков, центрированных



Рисунок 3 Участок Stupava DE04. Взрывы были произведены штабом Армии в точке в красной звездой. Схема отдельных 3C сейсмоприемников по линиям (1-8) и (A-G), SNS малые группы были установлены в точках с кратными треугольниками.

вокруг пикета 3C в виде равностороннего треугольника с апертурой 100 м; два вспомогательных канала

## Методика увеличения эффективности

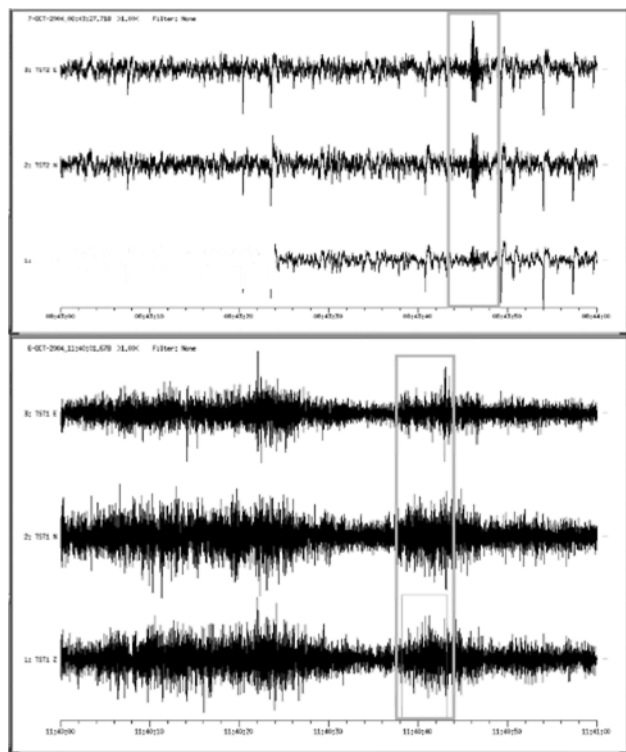


Рисунок 4 Взрывы 75 г были записаны на ближайших сейсмоприемниках 3С (А, 1 на Рис. 3) на расстоянии 500 м (обобщено из Labak et al., 2005). В зависимости от разных условий фонового шума, сигнал был либо обнаружен (вверху), либо полностью замаскирован (внизу).

могут записывать давление воздуха и скорость ветра (не доступно для DE004). На рис. 4 показано как обнаруживается самый слабый взрыв 75 г, или не обнаруживается в зависимости от локальных погодных условий, с помощью отдельных сейсмоприемников 3С на наименьшем расстоянии 500 м. На рис. 5 обобщаются результаты, согласно зависимости порога обнаружения от расстояния; в случае чувствительности 500 м на точку, потребуется порядка 1000 станций сетки для покрытия 1000 км<sup>2</sup> области исследования. И наоборот, единичные SNS работают хорошо до тех пор, пока SNS не будут распределены на 3 км, что даст в совокупности 30 SNS на области исследований и порог обнаружения при мониторинге достигнет  $M_L -2.0$ .

### Принципы работы

Как может наносейсмический мониторинг давать такие хорошие результаты? Результаты нельзя объяснить просто использованием подхода группирования: усиление в SNR едва ли 6 дБ при суммировании четырех вертикальных трасс, и редкая пространственная дискретизация не позволяет выполнять никакой анализ f-k. Основным ключом к успеху является инновационный, высоко интерактивный подход к ПО, который фокусируется на обновленном отображении в реальном времени ограничений на положение эпицентра, более продвинутом аппарате диагностики для анализа волн оператором, включая анализ шума, вместо недостаточно оптимальных, готовых подходов автоматического обнаружения STA/LTA. Аппарат программного обеспечения применялся в программе анализа волн HypoLine: На рис. 6 показан представительная распечатка экрана одной из кампаний SNS. Проект с фиксированными опорными точками облегчает ориентацию, а одноклавишная команда

**Макросейсм:** Исследование повреждений, вызываемых землетрясениями, что дает интенсивность землетрясений или интенсивность по шкале Mercalli 1-12, близкой к шкале Бофорта измерения скорости ветра.

**Микросейсм:** Доминантный пик шума Земли в диапазоне 5-15 Гц, вызываемый океаническими волнами и погодными возмущениями, известный с начала зарождения сейсмологии (Gutenberg, 1931).

**Микросейсмичность:** Землетрясения, уровень которых ниже человеческой чувствительности, скажем  $M_L 3.0$ , зарегистрированные локально (в пределах 100 км) или в региональном масштабе (до 3000 км).

**Микросейсмические системы наблюдений:** распределение сейсмоприемников в локальном или региональном масштабе для локализации и идентификации сейсмичности; также может быть использованы для акустического излучения и неразрушающих испытаний.

**Наноземлетрясения:** Предлагаемое название для землетрясений ниже  $M_L 0.0$ ; однако, все еще не принято сейсмологическим сообществом (Butler, 2003).

**Наносейсмический мониторинг:** локализация и идентификация процессов образования трещин с низким соотношением SNR, например, анализ наноземлетрясений с помощью трехдольных сейсмических станций.

**Акустическое излучение:** Запись сигналов образования трещин на малом расстоянии при высоких частотах, например, в шахтах. Магнитуды могут достигать  $M_L -3.0$ .

**Неразрушающее воздействие:** эксперименты в масштабе лаборатории для определения деформации образцов, записи трещинообразования продолжатся до тех пор, пока не произойдет вероятная неполадка зонда.

**Пассивная сейсморазведка:** Локализации возбуждения колебаний от процедуры образования трещин путем использования аппарата сейсморазведки и ПО, например, в концепции оборудованных нефтяных месторождений.

**Аналитическая сейсмология:** Локализация и идентификация несейсмических источников с использованием сейсмических сетей например, авиа крушений, взрывов подводных лодок (Zussa, 1998).

делает обмен информацией более быстрым. Каждый параметр наблюдения, такой как время до начала реакции или амплитуда, можно установить путем нажатия клавиши мыши, и непрерывно смещать с помощью клавиш стрелок. Все получаемые ограничения отображаются и обновляются в реальном времени. Таким же образом, все результаты обработки волн, такие как эпицентр, глубина, время возникновения, магнитуда, обратный азимут группы, и медленность, могут быть установлены или смещены с использованием сопутствующего обновления в реальном времени всех моделируемых наблюдений, например, теоретические времена вступления фаз, или максимумы амплитуд.

Такая же полностью интерактивная схема применяется к существенным параметрам локализации событий, таким как скорости и мощность слоя для различных моделей среды, или кривая корректировки магнитуда-расстояние. Истинный смысл интерактивной локализации событий лучше уловить путем загрузки ПО (Link2/), с соответствующим набором данных DE04. Целью взаимодействия является тестирование и проигрывание многочисленных возможностей идентификации фазы, которые существуют из-за низкого



## Методика увеличения эффективности

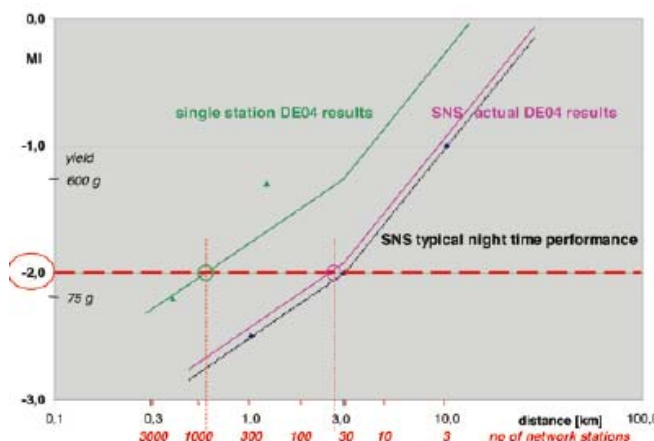


Рисунок 5 Кривые для порогов обнаружения в зависимости от расстояния обобщают результаты DE04. Подход основанный на использовании одной станции, состоящей из сейсмоприемников ЗС требует расстояний между станциями менее 500 м для гарантированного обнаружения волн с  $M_L -2.0$ . Это приводит к тому, что требуется более 1000 станций для покрытия области поиска 1000 км<sup>2</sup> OSI. Трехчастные расстановки SNS работают вблизи 3 км, что дает сокращение единиц системы до 30 блоков в целях покрытия всей области съемки.

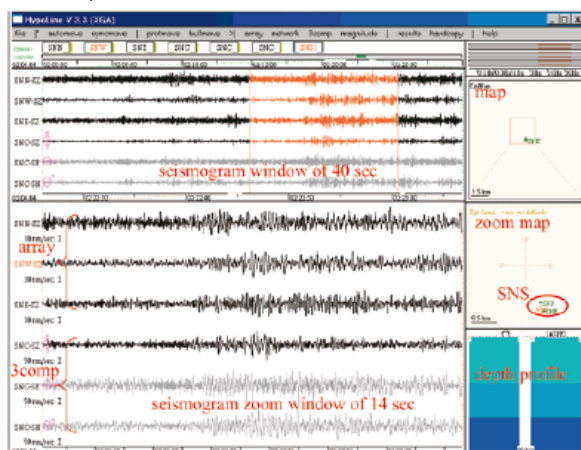


Рисунок 6 Структура экрана программы анализа HypoLine, на котором показана потенциальная волна на пороге возможностей обработки. Сейсмограммы были получены четырьмя станциями SNS, схематически показанными на увеличенной карте; были применены оптимальные фильтры для усиления SNR.

SNR, для проверки потенциальных решений по наиболее вероятным параметрам, и для изучения общего числа решений для событий подобного качества, например, близким различным границам слоев для определения глубины гипоцентра. В течение нескольких минут, аналитик может протестировать сотни альтернатив в целях локализации и идентификации волны, которая минимально превышает уровень фонового шума.

Обнаружение и диагностика типа волны поддерживается анализом сигнатуры  $f-t$  в сонограммах (Рис. 7), где под сонограммами понимают самонастраивающиеся, оптимальные фильтры нелинейной энергии на основе спектральных оценок медианного шума и вариации квантилей для мьютинга шума (Joswig, 1990, 1995). Это представление сигнала может использоваться для автоматического распознавания образа при стандартных наблюдениях; однако, духом OSI является поиск единичного, подозрительного исключения, которое препятствует вводу условий стандартной обработки путем простых процедур сканирования. Рис. 8

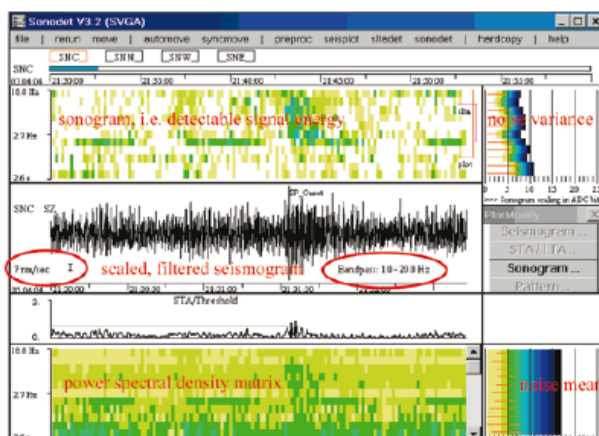


Рисунок 7 Сейсмограмма, сопутствующая матрица спектральной плотности (psd), и сонограмма. Матрица psd получена путем скользящего FFT, логарифмически бинирована по частоте и амплитуде. На сонограмме добавлено предварительное отбеливание и мьютинг шума, четко усилено изображение слабых, короткопериодных сигналов.

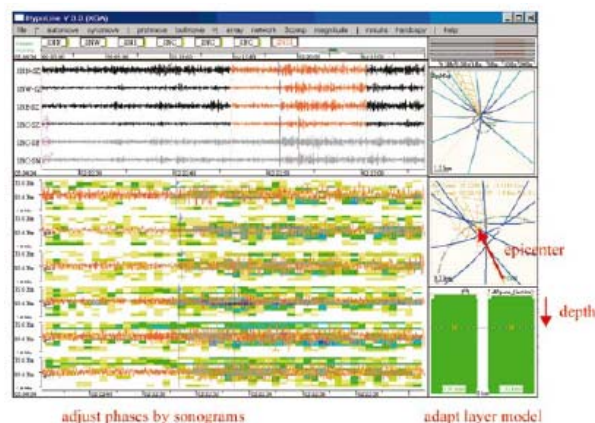


Рисунок 8 Результаты обработки для потенциальной волны на Рис. 6. Сонограммы руководят пикированием фазы четырех слабых вступлений, расщепление выборки дает четыре тройных перехода (красные точки на увеличенной карте). Для настройки эпицентра, изучается дополнительная информация из кружка  $t_s-t_p$  (пунктирный зеленый круговой сегмент) и направленности двух групп для вступлений P и S (зеленые веера). Волна имеет  $M_L -2.1$  на расстоянии 1.4 км по наклонной.

демонстрирует временные сегменты Рис. 6 в виде сонограмм, которые помогают обнаруживать пики фаз, и дают результаты локализации; событие имеет  $M_L -2.1$  на расстоянии 1.4 км (по наклонной).

### Проверка на устойчивость с помощью расщепления выборки

Центральную роль в обработке слабых сигналов играет реализация статистики. Для локализации волн, мы выбрали подход расщепления выборки (смотрите вставку) который идентифицирует вклад единичного, ошибочного параметра в общее, осредненное решение. Для этого, вся информация, относящаяся к гипоцентру, разбивается на графические ограничения локализации; для идеального решения они все встретятся в одной точке.

Давайте, прежде всего, начнем с простого случая наземных станций, и модели однородного полупространства для разреза. Затем

временная разность  $t_s - t_p$  для любой единичной станции дает полусферу с постоянным радиусом, что ограничивает положение подземного источника в пространственных координатах 3D (Рис. 9). Начиная с этого момента, мы сделаем оценку глубины гипоцентра в качестве внешнего параметра, который модифицируется аналитиком, вместо того, чтобы определяться с помощью инверсии данных. Правильным является то, что вариации в оценках эпицентра ( $x, y$ ) относятся к инкрементам времени с противоположным знаком для любого положения станции на совокупной расстановке; таким образом, можно определить четкий минимум остаточных времен для итеративной процедуры или процедуры поиска локализации сетки. Изменение глубины с другой стороны, повлияет на все наземные станции и вызовет инкременты времени разного знака, и на тот же эффект может также указывать небольшой сдвиг начала оси времени. Таким образом, определение глубины зависит от остаточных величин второго порядка, что делает глубину источника плохо определяемой в большинстве сейсмических изданиях.

Поскольку глубина является внешним параметром, каждая полусфера превращается в круг, как пересечение сферы и плоскости границы по глубине. Подобным образом, любая разность  $t_p - t_r$  между определенными временами вступления на станциях описывает полу-гиперболюид, который сокращается до гиперболы при пересечении с плоскостью глубин (Рис. 10). Двухточечная перестановка времен вступления для всех станций  $t_p$  формирует ансамбль расщепленной выборки гипербола, которые будут являться ограничением эпицентра, и будут управлять допустимой глубиной путем графической минимизации протяженности кривых. Однако, в пространстве решений 3D ( $x, y, t_0$ ) эпицентра источника и времени в очаге, два значения времени до реакции на станции  $t_p$  для любой единичной гиперболы формируют недоопределенную систему уравнений; получаемое решение масштабируется по третьему, недоопределенному параметру. В нашем случае, имея гиперболу для положения источника, свободный параметр - время в источнике  $t_0$ , которое протекает симметрично до более ранней исходной точки на обеих внешних сторонах (Рис. 11). Для получения математически точного решения для пространства параметров 3D, требуется три ограничения, которые преобразовываются к трем временам до начала реакции станции  $t_p$  в нашем случае. Таким образом три взаимосвязанные гиперболы всегда будут совпадать в одной тройной точке несмотря на выбор любого специфического параметра; ее существование не качественная мера

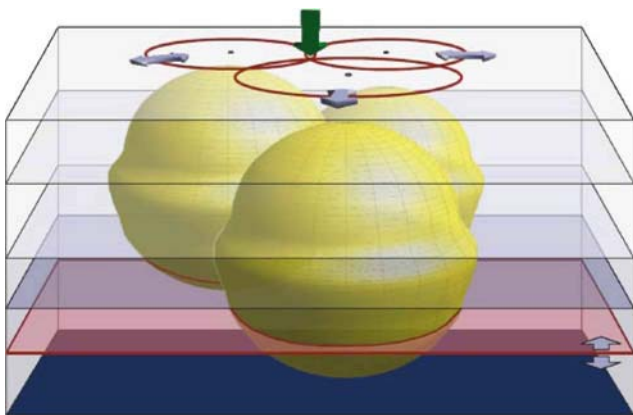
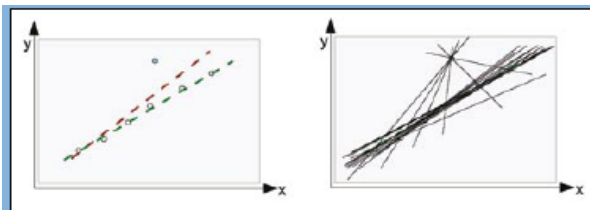


Рисунок 9 Пример трех сфер  $t_s - t_p$ , которые ограничивают положение гипоцентра. Поскольку глубина является внешним параметром, матово-красная плоскость глубин пересекает сферы в виде кружков. Их проекция на поверхность визуализирует локализацию; безупречное касание в одной точке требует изменение оценки глубины. Отклонение от идеальной сферичности достигается из-за рефракции траекторий лучей в слоистой модели среды.

### Расщепление выборки



Расщепление выборки – статистическая, устойчивая к выбросам, процедура для решения избыточно определенных систем, и помогает проследить влияние единичных (ошибочных) параметров на общее решение. Принцип поясняется нами в рассмотрении задачи поиска линейного тренда для семи наблюдений. На левом рисунке, красная пунктирная линия определяется стандартным анализом LMS; результат существенно компенсируется за счет единичного синего выброса. Вместо этого расщепление разбивает пространство параметров на участки, удовлетворяющие минимальным требованиям для линейного решения, т.е., от семи до двух точек, которые определяют одну прямую линию. Перестановка семи пар наблюдений дает 21 решений, или линий. На шесть из них влияет один выброс, тогда как 15 остаются невозмущенными. Графически можно распознать большое рассеивание всех возмущающих решений, и осреднить главный тренд зеленой пунктирной линией на левом рисунке. По сравнению с красным решением LMS, зеленая линия, очевидно, улучшает оценку корректного линейного тренда.

пропикированных вступлений фаз. Для экстремальных случаев симметрия приведет к наличию двух тройных точек, или слишком большие разности времен будут препятствовать существованию гипербола вообще. Смысл расщепления выборки, растяжение тройных точек, вместо размывания гипербола, охарактеризует потенциальные противоречия в пространстве параметра недоопределенной системы уравнений, т.е. более чем трех показаний  $t_p$  станции.

Для любого числа станций  $N \geq 3$  с вступлением  $P$  волн -  $t_p$  максимальное число гипербола  $N$  определяется уравнением (1)

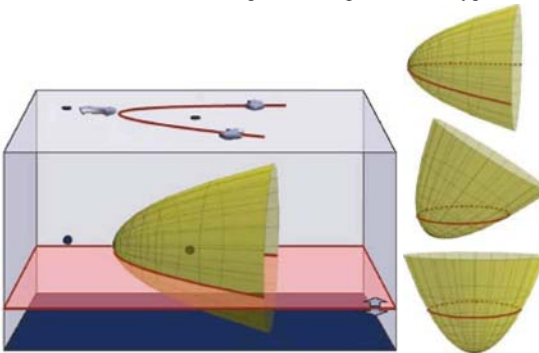


Рисунок 10 Ограничение на положение времен вступления для двух заданных станций - это гиперболюид вращения вокруг линии, соединяющей станции. Пересечение с плоскостью глубин формирует гиперболу, поскольку ось симметрии и плоскость глубин не пересекаются. Для подземных станций, или наклонных плоскостей глубин, можно вместо этого получить (деформированные) эллипсы.



## Методика увеличения эффективности

$$H = \sum_{k=1}^{N-1} k = \frac{N!}{(N-2)! 2!}, \quad (1)$$

при условии, что все разности во времени будут ниже отношения расстояния до станции к скорости (в противном случае гипербола не существует). Подобным образом, верхняя граница числа тройных точек  $T$  определяется уравнением (2)

$$T = \sum_{k=1}^{N-2} k(N-1-k) = \frac{N!}{(N-3)! 3!}, \quad (2)$$

Эти формулы характеризуют сильное увеличение перестановок, как это описывается в таблице 2 для  $N = 3 \dots 12$ , где  $N = 4$  описывает ситуацию для одного SNS.

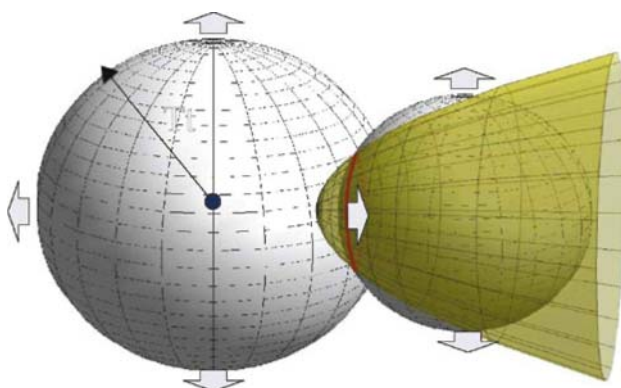


Рисунок 11 Любой гиперолоид может быть построен как пересечение двух сфер, которые растут из-за предположения о более раннем отсчете времени. Когда сферы деградируют из-за рефрагированных лучей (смотрите Рис. 9), получаемый гиперолоид имеет разрыв первой производной (здесь не показан).

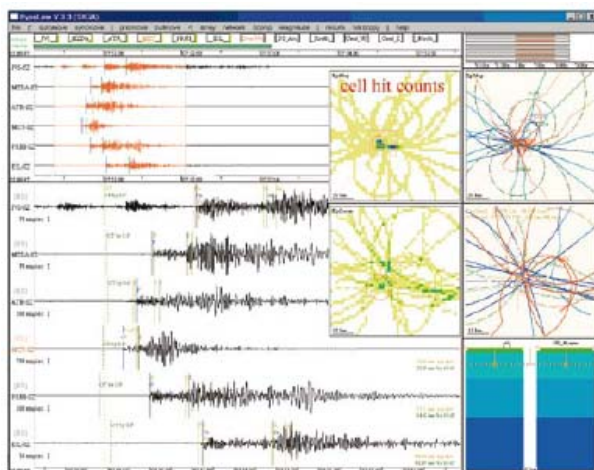


Рисунок 12 Локализация волны с помощью расщепления выборки на локальную сеть из шести станций. Большое число гипотез уже уменьшает читабельность карт. Вместо этого, число попаданий в ячейку можно закодировать цветом и отобразить на входе. Красные кружки отмечают автоматически определяемый максимум концентрации гипотез.

Для последних значений  $N = 8$ , многообразие гипербол не может быть разрешено ни на каком графике. Можно избежать подсчетов попаданий в ячейки, как при анализе томографического разрешения, и на Рис. 12 дается соответствующий пример. Наоборот, гипотезы (гиперболы, круги, лучи) могут размываться как плотности вероятности, и добавляться по способу нечеткой логики (Liu and Saanford, 2001). Можно интерпретировать ситуацию по 8+ станциям как точку перелома между графическим расщеплением выборки и итеративной инверсией Гейгера, т.е. остаточный анализ разности времен пробега для поиска наилучшего решения для локализации в смысле наименьших квадратов. Но даже тогда, анализ способом расщепления выборки все еще может быть полезен поскольку плотное рассеяние облаков тройных точек более реалистичная мера точности локализации, чем формирование контура эллипса 99% ошибки.

На другом конце числа станций, записи SNS достаточны для локализации слабых волн в пространстве и времени. Для эпицентров в пределах апертуры пяти SNS, можно также получить достоверную оценку, поскольку гиперболы и кружки сжимаются противоположным способом, когда плоскость глубин, задаваемая пользователем, поднимается или опускается (Рис. 13).

### Модели слоев и обработка расстановок

Как только мы отбрасываем предположение о простом полупространстве, полусферы вырождаются до слоистых сфер из-за эффекта рефракции (Рис. 9), и гиперолоиды должны строиться путем пересечения этих слоистых сфер с соответствующими разрывами первой производной (Рис. 11). Переход к подземным станциям приведет к вводу пересечений гиперолоидов и плоскости глубин, которые непараллельны оси вращения гиперолоида, и таким образом, могут дать эллипсы или даже круги, вместо гипербол, при пересечении кривых 2D (Рис. 10). Наш предел

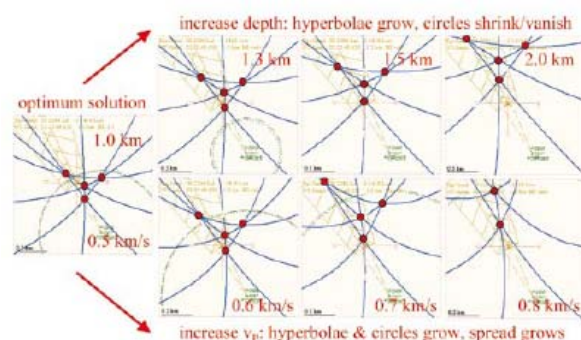


Рисунок 13 Оценка оптимальной глубины и  $v_P$  полупространства путем интерактивного скольжения параметров. Вариации глубины вызывают противоположные изменения гипербол и кружков; кружки исчезнут, если фронты волн не могут достичь поверхности для заданных времен пробега. Вариации  $v_P$  увеличат разброс тройных точек если оптимальное решение изменено.

N	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
H	3	6	10	15	21	28	36	45	55	66
T	1	4	10	20	35	56	84	120	165	220

Таблица 2 Станции  $N$ , гиперболы  $H$ , и тройные точки  $T$  согласно анализу расщепления выборки.

# Методика увеличения эффективности

для моделирования в реальном времени – это описание наклонных слоев, секущих симметрию гиперболоида, и требование к 3D трассированию лучей для определения путей пробега с минимальным временем (Рис. 14).

Обработка информации расстановки в HypoLine остается простой при всех ранее упомянутых условиях. Удовлетворение идее расщепления выборки требует пертурбации значений фаз позиции расстановки на триплеты, каждый из которых описывает обратный азимут и медленность. Для трехчастного SNS с центральным пикетом 3С, получаем четыре луча на SNS. Распространение лучей крайне чувствительно к всякой вариации параметров, и ее минимум дает надежную оценку для точной пикировки фаз вступлений даже при плохих условиях SNR. Подробности определения магнитуд, в частности распространение классической шкалы  $M_L$  на расстояния ниже 10 км, описываются у Wust-Bloch и Joswig (2006). Схема корреляции основного ЯВ и определения относительного гипоцентра в HypoLine разработана в Hage & Joswig (2008). Детальное описание всех аспектов наносейсмического мониторинга можно найти в документации /link2/.

## DE04 результаты и выводы

Для обработки волн DE04, в таблице 3 обобщается чувствительность обнаружения, а в таблице 4 результаты обработки однодневной SNS.

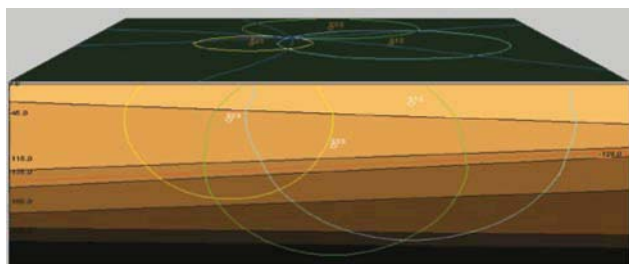


Рисунок 14 Пример графической локализации для подземных станций и модели наклонных слоев. Кривые горизонтальных пересечений определяются вдоль адаптивно наклонного глубинного слоя (красная линия); вертикальный срез отображает сильную деформацию окружностей  $t_s$ - $t_p$ .

Проведенные взрывы не могли быть определены, но были локализованы в большинстве случаев. Определенная магнитуда предполагает мощность взрывного устройства 100 г для воображаемого порога  $M_L$  -2.0 мониторинга OSI. Рис. 15 демонстрирует пример для первого взрыва, 75 г в таблице 3. Событие с  $M_L$  -2.1 лежит на границе возможностей обработки, времена вступления фазы могут быть получены только при анализе расстановки. Рис. 16 относит определенные магнитуды к мощности взрыва, где экстраполяция в целях установления кривых магнитуды – ядерных взрывов кажется логичной (Khalturin et al., 1998). Изменения наклона может указывать на уменьшение доли излучаемой сейсмической энергии, поскольку более крупные взрывы вызовут большую долю испарения. Концепция наносейсмического мониторинга оказалась успешной при дальнейших полевых испытаниях и полевых тестах СТВО, и будут тестироваться в полном объеме для 30 SNS во время крупного, комплексного

## 3-компонентные станции

Мощность [г]	Порог обнаружения [м]
75	340-500
150	340-500
200	1200
400	1900
475	2600
600	2600

## Трехчастные мини-расстановки

Мощность [г]	Возможность локализации [м]
75	1500
150	1500
200	2500
400	2500+
475	2500+
600	2500+

Таблица 3 Результаты чувствительности 3С одиночных станций по сравнению с малыми расстановками.

Турецкий холм 1.0 км				Противопол. холм 1.5 км		Холм вблизи станции Е 2.5 км	
ОТ	Заряд [г]	MI	Коммент.	MI	Коммент.	MI	Коммент
08:43:45	75	-2.1	+ автом.	-	обнаружено	-	Слишком слаб.
08:47:20	150	-1.7		-2.0		-	обнаружено
08:50:55	200	-1.4		-1.7		-1.5	
08:54:40	400	-1.3	+ акустика	-1.5	+ акустика	-1.4	
08:58:25	475	-1.2		-1.4		-1.4	
09:02:05	600	-1.2	+ акустика	-1.3		-1.3	
09:35:35	75	-2.1		-2.4		-	обнаружено
09:39:20	150	-1.8		-1.9		-1.9	
09:43:30	200	-1.7		-1.7		-1.9	
09:47:10	400	-1.4		-1.6		-1.5	
09:51:30	475	-1.5		-1.6		-1.5	
09:55:50	600	-1.3		-1.4		-1.4	

Результат обработки малых расстановок (SNJ и HypoLine) от 7. окт. 2004

Таблица 4 Бюллетень одиночных волн по результатам обработки данных малых расстановок. 2008 EAGE www.firstbreak.org

## Методика увеличения эффективности

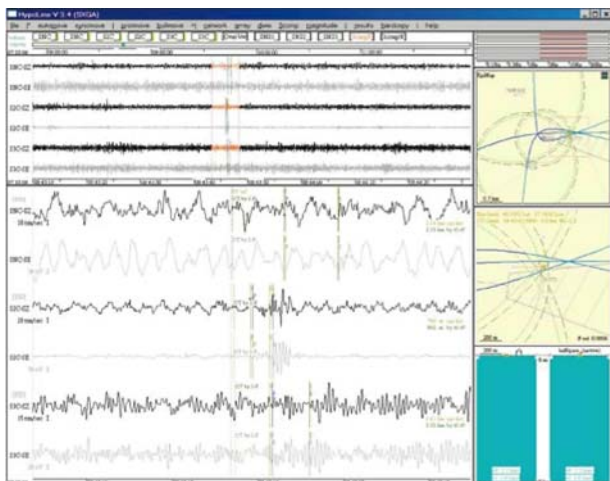


Рисунок 15 Экстремальный пример набора данных DE04, на котором демонстрируется самый слабый взрыв 75 г, зарегистрированный тремя SNS (отображаются вертикальная и горизонтальная трассы 3С центральных геофонов на SNS). Надежное пикирование фазы может выполняться для ближайшего SNS путем обработки группы; другие фазы могут быть отрегулированы на основе внешнего правдоподобия. Как только доступны более сильные отражения от одного источника, они могут быть использованы в качестве основных ЯВ для корреляции (здесь не показаны).

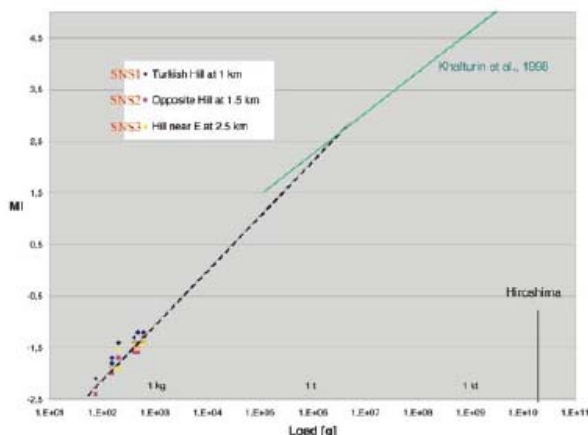


Рисунок 16 Компильция результатов SNS из таблицы 4. Наблюдаемое соотношение магнитуды и заряда для моделированных афтершоков DE04 простирается до крупных, подземных ядерных взрывов с зарядом, большим в миллион раз, если учитывается менее эффективный контакт, например ввиду испарения.

полевого эксперимента IFE08, OSI на бывшем Советском ядерном полигоне в Семипалатинске, Казахстан осенью 2008.

## Благодарности

Др. Gideon Leonard, из Израильской комиссии по ядерной энергии, будучи воодушевленным, частично поддержал первые шаги разработки ПО. Др. Hillel Gilles Wust-Bloch, Университет Тель Авива, присоединился к первым полевым тестам в Израиле. Термин 'наносейсмология' возник в наших частых обсуждениях, и был сформулирован Др. Leonard. Эксперимент DE04 был организован Patrick Dewez, CTBTO, который поддержал наши полевые измерения SNS, и обеспечил данные. Результаты 3С с DE04 были предоставлены Др. Peter Labak, из Словацкой Академии наук. Andreas Eisermann, Университет Штутгарта, исследовал эффекты

наклонных слоев модели и подземных станций, и предоставил Рис. 9-11, 14.

## Литература

- Butler, R. [2003] The Hawaii-2 observatory: observation of nanoearthquakes, *Seism. Res. Lett.* 74, 290-297.
- Gutenberg, B. [1931] Microseisms in North America, *Bull. Seism. Soc. Am.* 21, 1-24.
- Hage, M. and Joswig, M. [2008] Spatiotemporal characterisation of inter-swarm period seismicity in the focal area of Novy Kostel (West Bohemia/Vogtland) by a short-term microseismic study, *Geophys. J. Int.* (submitted).
- Joswig, M. [1990] Pattern recognition for earthquake detection, *Bull. Seism. Soc. Am.* 80, 170-186.
- Joswig, M. [1995] Automated classification of local earthquake data in the BUG small array, *Geophys. J. Int.* 120, 262-286.
- Khalturin, V.I., Rautian, T.G. and Richards, P.G. [1998] The seismic signal strength of chemical explosions, *Bull. Seism. Soc. Am.* 88, 1511-1524.
- Kochnev, V.A., Goz, I.V., Polyakov, V.S., Murtayev, I.S., Savin, V.G., Zommer, B.K. and Bryksin, I.V. [2007] Imaging hydraulic fracture zones from surface passive microseismic data, *First Break*, 25(10), 77-80.
- Labak, P., Joswig, M., Fojtkova, L., Dewez, P. and Guendel, F. [2005] Detection capability of 3-component seismic stations and tripartite mini-arrays: CTBT monitoring of artificial nanoevents with  $M < 0$ . *EGU meeting*, Vienna.
- Lay, T. and Wallace, T.C. [1995] *Modern global seismology*. Academic Press, San Diego CA.
- Lee, W.H.K. and Stewart, S.W. [1981] *Principles and applications of micro-earthquake networks*. Academic Press, New York.
- Lin, K.-W. and Sanford, A.R. [2001] Improving regional earthquake locations using a modified G matrix and fuzzy logic. *Bull. Seism. Soc. Am.* 91, 82-93.
- /link1/ <http://www.ctbto.org/>.
- /link2/ <http://www.nanoseismic.net/>.
- Oye, V. and Roth, M. [2001] A new processing package for microseismic monitoring of hydrocarbon reservoirs. *71st SEG Annual International Meeting*, San Antonio, TX, Abstract.
- Oye, V. and Roth, M. [2003] Automated seismic event location for hydrocarbon reservoirs, *Computers & Geosciences* 29, 851-863.
- Walter, M. and Joswig, M. [2008] Seismic monitoring of fracture processes generated by a creeping landslide in the Vorarlberg Alps, *First Break* 26(6), 131-135.
- Wust-Bloch, G.H. and Joswig, M. [2006] Pre-Collapse Identification of Sinkholes in Unconsolidated Media at Dead Sea Area by 'Nanoseismic Monitoring' (graphical jackknife-location of weak sources by few, low-SNR records). *Geophys. J. Int.* 167, 1220-1232.
- Zucca, J.J. [1998] Forensic seismology supports the Comprehensive Test Ban Treaty, *Science & Technology Rev.*, LLNL, CA., Sept. 1998, 4-11.
- Zucca, J.J., Carrigan, C., Goldstein, P., Jarpe, S., Sweeney, J., Pickles, W.L. and Wright, B. [1996] Signatures of testing: on-site inspection technologies. In (Eds) Husebye, E.S. and Dainty, A.M. *Monitoring a Comprehensive Test Ban Treaty*, NATO ASI, Series E, 303, 123-134, Kluwer, Dordrecht.