

Мониторинг слабых эндогенных эмиссионных источников в присутствии интенсивных техногенных помех

И.Я. Чеботарева*

Институт проблем нефти и газа РАН, Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д.3

(Статья поступила 13.11.2014; Подписана в печать)

Ранее были разработаны и успешно опробованы в геофизических исследованиях алгоритмы эмиссионной сейсмической томографии. Обнаружено, что интенсивные источники техногенного излучения создают экранирующий эффект, препятствующий мониторингу слабых эндогенных источников, связанных с процессом массопереноса флюида и реакцией среды на изменение напряженно-деформированного состояния. Специальные методы пространственной фильтрации позволяют снимать экранирующий эффект техногенных помех и визуализировать слабые эндогенные источники, что демонстрируют результаты численного моделирования и анализа полевых данных.

Методы пространственной фильтрации в силу своих особенностей чувствительны к плотности системы наблюдений и ее геометрии, при неблагоприятных условиях алгоритмы могут потерять работоспособность. На конкретном примере с помощью численного моделирования показано, как можно модернизировать уже существующую на геодинамическом полигоне систему наблюдений, чтобы исправить ситуацию. Оказалось, что небольшое увеличение числа точек регистрации при правильной их расстановке способно полностью восстановить работоспособность фильтрационных алгоритмов и обеспечить работоспособность системы наблюдений в условиях интенсивных техногенных помех.

PACS: 91.30.Ab, 93.85.Pq

УДК: 550.34.01:550.834

Ключевые слова: эмиссионная сейсмическая томография, техногенная помеха, пространственная фильтрация.

ВВЕДЕНИЕ

Метод эмиссионной сейсмической томографии был первоначально разработан в рамках сейсмологических исследований для локализации слабых шумоподобных эндогенных сейсмических источников с возможностью оценки мощности и спектра излучения [1–3]. Физической основой метода является факт существования в энергонасыщенной геосреде областей слабого сейсмического эмиссионного излучения. Они активизируются при деформационных природных и техногенных воздействиях. Это разломы и отдельные большие трещины, раздробленные, трещиноватые зоны, каналы фильтрации флюида, а также области концентрации напряжений, резких термических градиентов и фрикционных проявлений, скрытых для методов традиционной сейсморазведки. Входными данными для алгоритмов эмиссионной томографии являются волновые формы, зарегистрированные многоканальной системой регистрации, — сейсмические записи естественного шума Земли (сейсмического фона) или шумоподобной коды землетрясений и взрывов. В результате компьютерной обработки сейсмической информации получают изображения среды — трехмерное распределение активных источников и детерминированных рассеивателей. Преимущество по сравнению с традиционными для сейсмологии методами локализации сейсмических источников состоит в том, что в алгоритмах отсутствует этап определения времен вступления сигналов, по-

этому они эффективно работают при нечетких и интерферирующих вступлениях, при слабых сигналах, полностью маскируемых шумом на единичных записях.

1. ОРДИНАРНЫЕ АЛГОРИТМЫ ЭМИССИОННОЙ ТОМОГРАФИИ

Первоначальный алгоритм эмиссионной томографии был предложен с реализацией во временной области [1]. Модель излучателя — область среды, заполненная точечными источниками. Алгоритм использует сканирование объема под группой станций по трехмерной сетке. Для каждой точки опроса рассчитываются временные задержки, соответствующие времени пробега сигнала из точки опроса в точку приема с учетом скоростной модели среды. После введения временных задержек мгновенные амплитуды записей суммируются между собой и накапливаются в выбранном временном окне. При однокомпонентном приеме изображение среды численно рассчитывается с помощью когерентной многоканальной меры *Semblance*:

$$S(\rho) = \frac{\sum_{j=1}^T \left(\sum_{i=1}^K x_i(t_j - \tau_i(\rho)) \right)^2}{\sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^K x_i^2(t_j - \tau_i(\rho))}, \quad (1)$$

где $x_i(t_j)$ — мгновенная амплитуда принимаемого сигнала на i -м датчике группы в момент времени t_j , $\tau_i(\rho)$ — временная задержка, соответствующая времени прохода сигнала от точки опроса с координатами ρ до i -го датчика группы, K — число приемных каналов, T — число независимых временных отсчетов,

*E-mail: irinache@inbox.ru

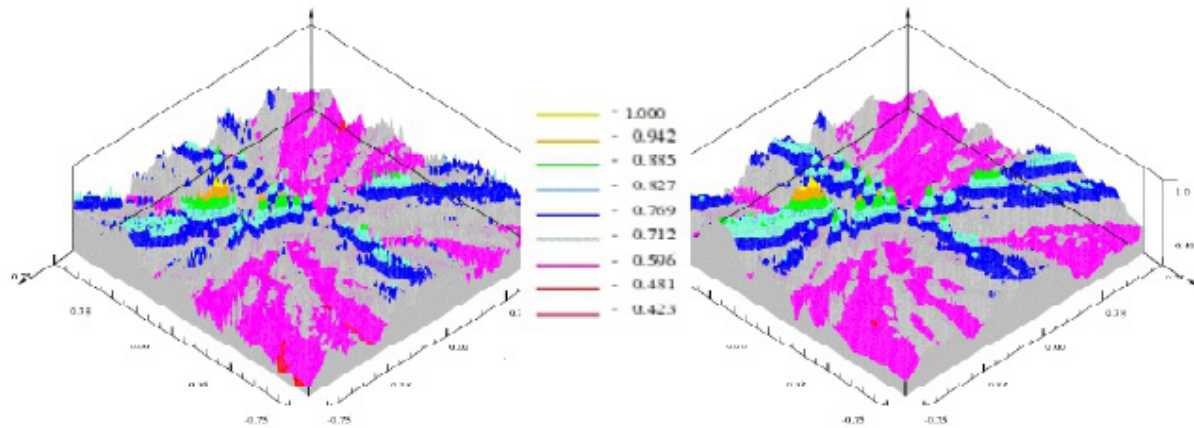


Рис. 1: Сейсмоэмиссионные изображения техногенного сейсмического источника, расположенного на поверхности. Слева — расчеты по алгоритму во временной области, справа — расчеты по алгоритму в частотной области

$T = 2Bt_0$, где B — граничная частота, t_0 — длина временного окна накопления сигналов.

Если на записях присутствует только случайный шум, некоррелированный между каналами, распределение яркости в изображении равномерно и статистический разброс определяется временем накопления. При появлении на записях пространственно когерентного сигнала значение в точке опроса, совпадающей с источником, резко возрастает и в изображении появляется яркое пятно. В этом случае численное значение когерентной меры (1) при слабом сигнале пропорционально числу каналов и мощности полезного сигнала.

Алгоритмы эмиссионной томографии могут быть реализованы и в частотной области. Аналог алгоритма (1) в частотной области имеет вид

$$P_b(\rho) \approx \sum_{f_{\min}}^{f_{\max}} \mathbf{h}^*(f_0, \rho) \hat{\mathbf{F}}_x(f_0) \mathbf{h}(f_0, \rho) \Delta f, \quad (2)$$

где f_0 — центральная частота анализируемого частотного диапазона Δf , f_{\max} , f_{\min} — верхняя и нижняя граничная частота, $(\mathbf{h}(f) = \exp\{-i2\pi f \tau_k(\rho)\})$, $k = 1, \dots, K$ — вектор-столбец фазовых задержек, определяемых временными задержками $\tau_k(\rho)$, $\hat{\mathbf{F}}_x(f)$ — сглаженная оценка спектральной матрицы многоканальных данных приемной группы. Качество изображений при использовании алгоритма в частотной (2) и временной (1) области одинаково, что иллюстрирует рис. 1.

При спектральном подходе к локализации эндогенных источников метод может быть реализован с использованием различных когерентных мер, при этом положение источников излучения в среде определяется пространственным распределением максимумов числового поля. Известно много когерентных мер, которые дают примерно то же качество изображения, что и мера (1). Показано, что все они могут быть выражены друг через друга и записаны в виде функционалов от

функции сигнал/помеха. Кроме того, существуют когерентные меры, которые формируют более острые пики в изображении, а также меры, более устойчивые к флуктуациям фазы сигналов.

Кроме спектрального подхода, в эмиссионной томографии могут использоваться параметрические методы локализации источников. При этом положение источников излучения в среде определяется не пространственным распределением максимумов когерентной оценки, а как значения параметров, минимизирующих некоторую функцию качества. Параметрические алгоритмы способны обеспечить очень высокую точность локализации источника и одновременную оценку других параметров, таких как, например, диаграмма направленности и средняя скорость в среде. Однако, при неблагоприятных условиях такие алгоритмы могут оказаться расходящимися или решение может оказаться несостоятельным. К тому же такие алгоритмы вычислительно чрезвычайно затратны. Практика их использования показывает, что время счета аналогичных задач для параметрического метода составляет несколько дней при использовании мощных суперкомпьютеров, в то время как для спектрального подхода расчеты укладываются в несколько часов счета на персональном компьютере.

2. АЛГОРИТМЫ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ КОГЕРЕНТНЫХ ПОМЕХ

В процессе адаптации метода эмиссионной сейсмической томографии к исследованию процессов, протекающих на территории разрабатываемых месторождений углеводородов, выявилось наличие серьезной проблемы: полоса частот техногенных помех перекрывает полосу частот полезного сигнала и не редко помеха превышает его по интенсивности. Техногенные помехи являются пространственно коррелированными, и при использовании ординарных алгоритмов визуализации

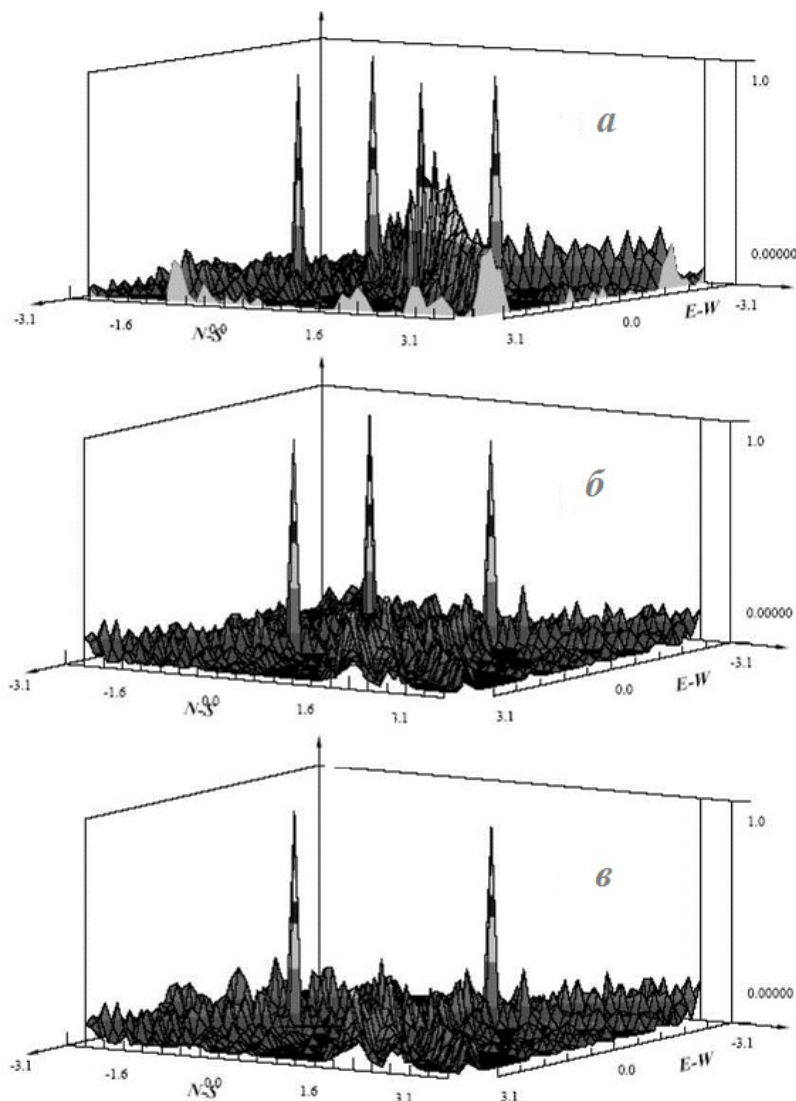


Рис. 2: Результат использования режекторного пространственного фильтра, а — исходная модель четырех источников, б — результат подавления одного источника, в — результат подавления двух источников

зации видны только более мощные техногенные источники. Даже удаленные от площадки наблюдений мощные источники техногенной помехи могут порождать яркие артефакты в изображении и создавать экраняющий эффект, препятствующий мониторингу слабых сейсмических источников, связанных с процессом массопереноса флюида и реакцией среды на изменение напряженно-деформированного состояния.

Для решения проблемы устранения влияния пространственно-коррелированной техногенной помехи были разработаны новые и адаптированы известные в сейсмологии методы пространственной многоканальной фильтрации [4–6]. На рис. 2 и рис. 3 приведены результаты численного моделирования с использованием двух из таких методов.

Режекторный фильтр, рис. 2, позволяет очень эффективно устранять из изображения вклады от одного или

нескольких источников, если известны координаты источников, тип излучаемых волн и скоростная модель среды. Возмущения изображения, которые создает мешающий источник сигналов, практически полностью устраняются. В реальных условиях, если параметры источника приходится оценивать из эксперимента, режекторный фильтр не настолько совершенен. Как показывают экспериментальные исследования, он позволяет ослабить техногенную помеху, но не обеспечивает такого высокого качества очистки изображений, как при моделировании. При анализе полевого материала лучшие результаты дает адаптивная фильтрация.

На рис. 3 приведены результаты моделирования при использовании одного из адаптивных фильтров. Физический смысл данного фильтра состоит в том, что он выставляет нули диаграммы направленности в соответствии с максимумами пространственной корреляции

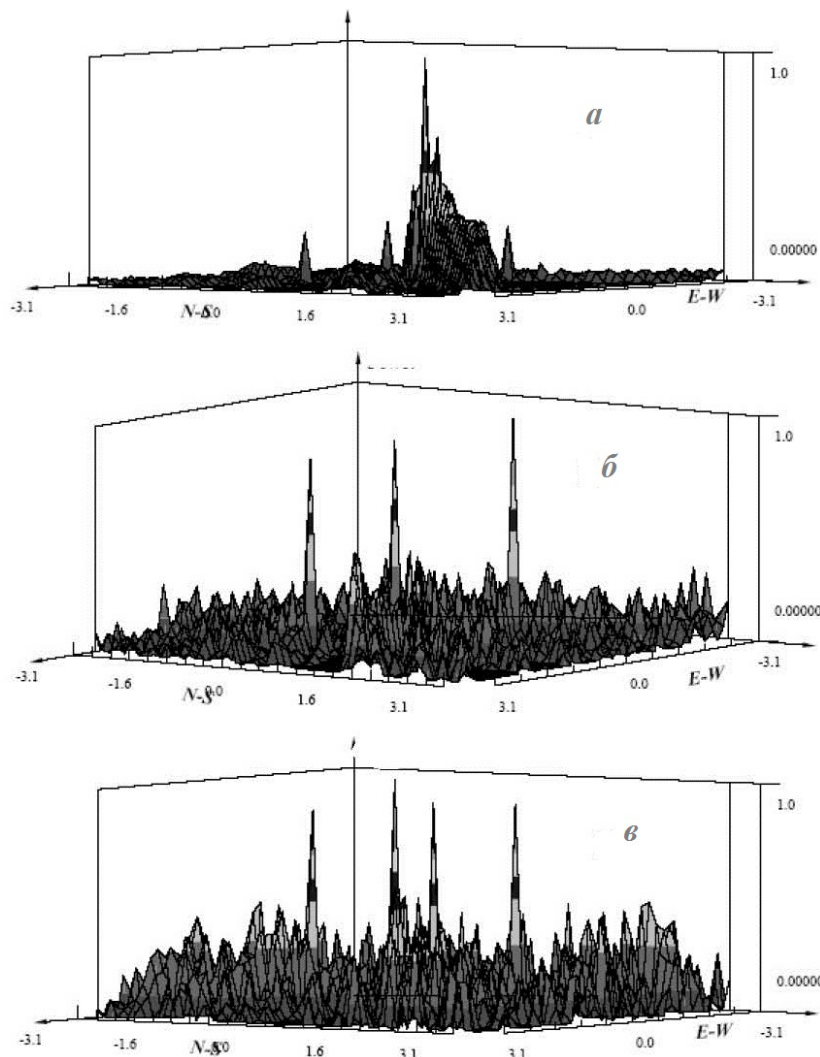


Рис. 3: Результат использования адаптивного пространственного фильтра, а — исходная модель в виде трех слабых источников полезных сигналов и сильной когерентной помехи, б — результат подавления с настройкой по «чистой помехе», в — результат подавления с настройкой по смеси полезных сигналов и чистой помехи (режим самоадаптации)

помехи. Если имеется возможность получить записи «чистой помехи», то данный фильтр работает как оптимальный, позволяя легко и полностью подавить влияние интенсивной помехи, существенно превышающей по мощности полезный сигнал, рис. 3б.

При полевых исследованиях обычно невозможно получить запись «чистой помехи», регистрируемая запись является смесью полезного сигнала и помехи. Замечательным свойством используемого фильтра является то, что он допускает адаптацию по смеси помехи и полезного сигнала (режим самоадаптации). При этом явно не используется информация о спектрах излучения и координатах источников, а подавляется наиболее сильный сигнал из смеси сигналов. Необходимо отметить, что при работе в режиме самоадаптации эффективность фильтрации сильно зависит от ряда параметров и может оказаться менее эффективной, чем при адаптации по чистой помехе. При использованных па-

раметрах численного моделирования, например, сильный сигнал подавляется не полностью, но ослабляется до уровня полезных сигналов, рис. 3в.

Для стабилизации работы адаптивного фильтра используются специальные параметры. От значения параметров зависит степень подавления помехи и устойчивость фильтра. Как показывает моделирование, оптимальное подавление достигается при определенном соотношении параметров. При этом, при больших значениях параметров подавления помех не происходит — фильтр не работает, а при слишком малых значениях алгоритм теряет устойчивость и фокусировка всех источников полностью «рассыпается». Надежных правил выбора оптимальных значений стабилизирующих параметров к данному моменту не разработано. На практике использовалась следующая схема. Были разработаны независимые методы адаптивной фильтрации, работа которых контролируется другими параметрами,

а также методы грубой оценки значений стабилизирующих параметров. Уточнение значений параметров проводилось в ходе обработки данных, и критерием служила степень схожести изображений среды, полученных при подавлении техногенной помехи независимыми алгоритмами адаптивной фильтрации.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ МОНИТОРИНГЕ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Рис. 4 иллюстрирует эффективность применения пространственной адаптивной фильтрации при обработке полевых данных, зарегистрированных на разрабатываемом нефтяном месторождении в западной Сибири. При использовании ординарного алгоритма эмиссионной сейсмической томографии на изображении визуализируются только источники техногенной помехи, связанные с шумящей фонтанирующей скважиной, рис. 4а. Правый, сложный по структуре источник расположен в районе скважины и является активным. Левый протяженный источник — вторичный, он совпадает по положению с участком разлома и является результатом рассеяния техногенного сигнала от шумящей скважины. Эти два ярких источника доминируют в изображении и экранируют более слабые глубинные эмиссионные источники.

Применение адаптивной пространственной фильтрации позволяет полностью устранить техногенную экранировку. На рис. 4б, в изображении техногенных источников исчезают и проявляются области глубинного эмиссионного излучения. На рис. 4б показан результат использования в режиме самоадаптации того же фильтра, что на рис. 3. Как уже говорилось, в смеси пространственно когерентных сигналов он подавляет наиболее сильный сигнал. На рис. 4в показан результат использования другого адаптационного фильтра, позволяющего последовательно снимать сигналы, дифференцируя их по мощности, и переходить к анализу все более слабых сигналов. Такой фильтр позволил еще более очистить изображение. Четко выделился маломерный в плане, вертикально протяженный объект, расположенный под забоем скважины. Он предположительно интерпретируется как вертикальная нефтяная ловушка, в которую попала скважина, давшая сильный приток нефти.

4. ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ

Устойчивость используемых методов пространственной фильтрации относительно различных параметров еще недостаточно исследована. В частности, методы пространственной фильтрации в силу своих особенностей чувствительны к плотности и геометрии систе-

мы наблюдений и при неблагоприятных условиях могут потерять работоспособность. С подобной ситуацией мы столкнулись при проведении работ на геофизическом полигоне, который расположен на удалении от явных источников помех, но в регионе с интенсивной индустриальной деятельностью. Сигналы, даже от удаленных техногенных источников, создавали экранирующий эффект в виде ярких артефактов на изображении среды по территории полигона. В частности, при некоторых азимутах на источник помех четко просматривалось изображение оврага на поверхности как результат рассеяния техногенного излучения.

Относительно яркие источники были видны и без пространственной фильтрации — это зона бурения при проходке неглубокой скважины и подсвеченный в процессе бурения сейсмический резонатор на глубине около 300 метров. Однако наблюдению более слабых источников, связанных с процессами фильтрации флюида, препятствовало присутствие в фоновом сейсмическом волновом поле техногенной помехи от удаленных индустриальных источников. Адаптивная фильтрация при существующей расстановке сейсмических датчиков не сработала.

С помощью численного моделирования удалось показать, как можно для исправления ситуации модернизировать уже существующую на геодинамическом полигоне систему наблюдений. Оказалось, что небольшое увеличение числа точек регистрации при их правильной расстановке способно полностью восстановить работоспособность адаптивных фильтрационных алгоритмов. В верхней части рисунка рис. 5 приведены геометрии существующей и рекомендованной дополненной системы регистрации. Волновое поле моделировалось суммой сигнала от слабого точечного источника на территории полигона и сигналов от двух мощных удаленных техногенных источников с существенно различными азимутами прихода.

При использовании ординарного спектрального алгоритма фокусировки при всех видах расстановки на поверхности наблюдаются интенсивные артефакты, полностью маскирующие положение точечного источника. Как видно из рис. 5а2, применение пространственной адаптивной фильтрации при существующей геометрии приемной группы не позволяет устранить артефакты, связанные с наличием удаленной техногенной помехи. Добавление всего 8 дополнительных точек регистрации при условии правильной их расстановки в корне меняет результат и восстанавливает работоспособность алгоритмов пространственной фильтрации. На рис. 5б2, влияние техногенной помехи полностью устранено, что позволило четко выделить слабый техногенный источник, расположенный на территории полигона. Общие рекомендации — при минимальном числе точек регистрации предпочтительно случайное равномерное расположение датчиков с шагом расстановки не сильно превышающем длину волны техногенного излучения.

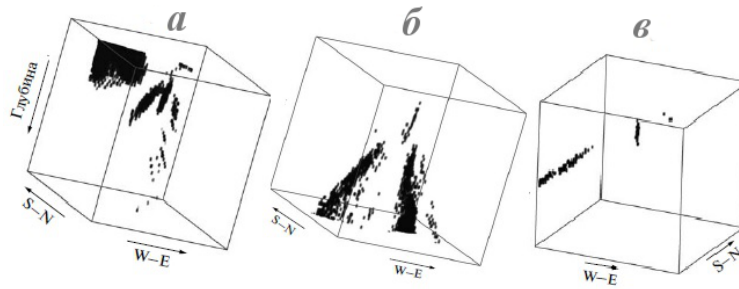


Рис. 4: Изображения среды, рассчитанные по полевым сейсмическим записям, а — ординарный алгоритм, б и в — два различных алгоритма адаптивной фильтрации. Размер ребра куба равен 6 км

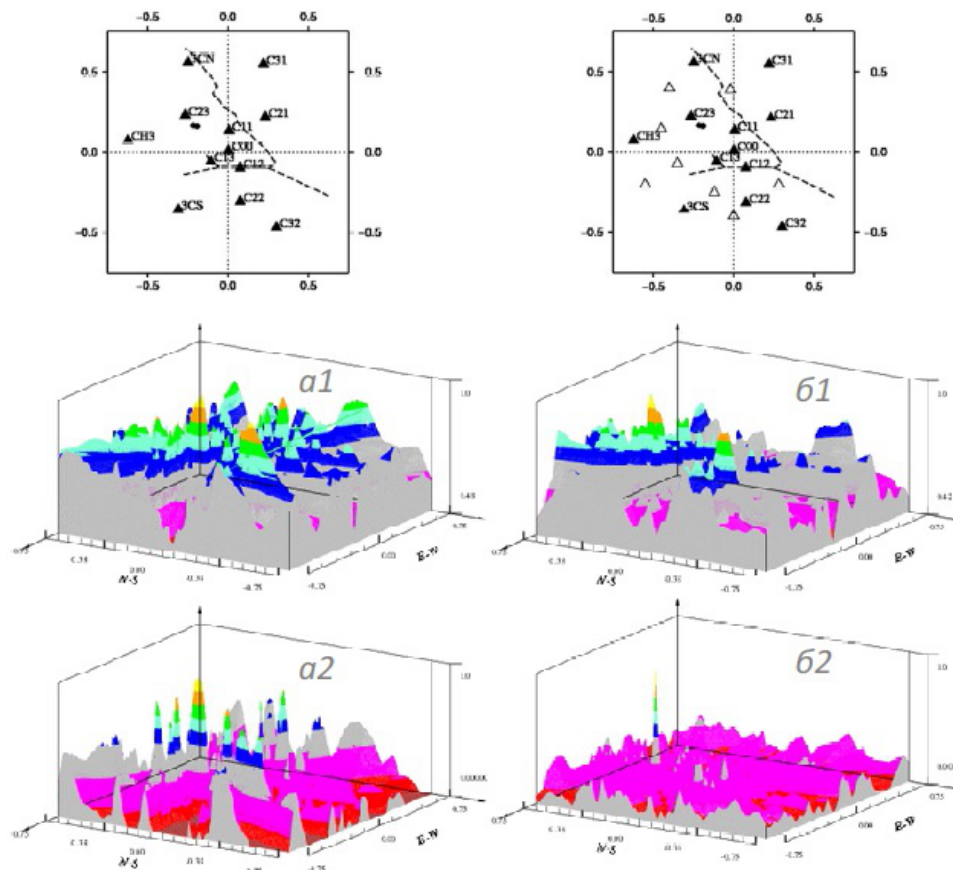


Рис. 5: Результаты численного моделирования работоспособности алгоритмов подавления техногенной пространственно когерентной помехи, слева — для существующей, справа — для рекомендованной геометрии сейсмических групп. Штриховая кривая помечает положение оврага на площадке наблюдений. Модельное волновое поле представлено наложением сигнала от точечного источника (полезный сигнал), расположенного на территории группы, с небольшим диффузным шумом, и сигналами от двух удаленных источников (когерентная помеха), расположенных в северном и западном направлениях от группы; (а1), (б1) — расчет изображения с использованием ординарного алгоритма, (а2), (б2) — результат использования алгоритма с пространственной адаптивной фильтрацией для подавления интенсивной когерентной помехи

5. ПОЛЕЗНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ ПОМЕХИ

Техногенная помеха, с одной стороны, является мешающим фактором при исследовании экстремально сла-

рых глубинных источников методом эмиссионной сейсмической томографии. Для устранения экранирующего эффекта, который она создает, приходится разрабатывать дополнительные методы пространственной фильтрации. С другой стороны, техногенная поме-

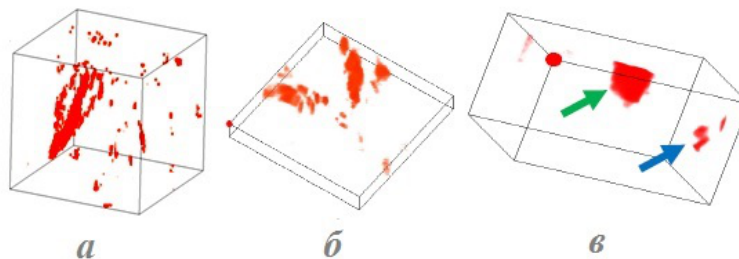


Рис. 6: Сейсмическая визуализация эндогенных объектов: а — природная трещина, подсвеченная перфорационным взрывом, б — овраг, подсвеченный техногенной помехой от мощных удаленных промышленных источников, в — глубинный резонатор (синяя стрелка) подсвеченный шумом от источника бурового инструмента (зеленая стрелка)

ха создает дополнительную сейсмическую подсветку, в которой проявляются геологические объекты, без нее не видимые. Примеры таких объектов показаны на рис. 4б, в, и рис. 6.

Геологический объект на рис. 4, видимый при подсветке от шумящей фонтанирующей скважины, обсуждался ранее.

На рис. 6а, на времени перфорационного взрыва четко высветилась боковая граница подвижного блока, который активизировался и четко высветился позже, на стадии проведения гидроразрыва пласта. Перфорационный взрыв является маломощным и высокочастотным. В полосе частот регистрирующей аппаратуры на одиночных записях он не просматривается. Однако, на времени взрыва ослабленная зона активизировалась до такой степени, что удалось просмотреть ее положение до глубины 3 км.

На рис. 6б показано изображение зоны нарушения пород, которые на поверхности проявляются в виде оврага с водотоком по дну. Положение оврага на площадке наблюдений показано штриховой линией на схе-

ме в верхней части рис.5. При некоторых азимутах подхода техногенной помехи от мощных удаленных промышленных источников изображение оврага и прилегающей к нему низкоскоростной зоны пород четко просматриваются на изображениях среды.

На рис. 6в приведено изображение сейсмического резонатора на глубине 250 м, который проявился на времени бурения неглубокой, 60-метровой скважины. Он виден только в процессе бурения, в перерывах бурения его изображение исчезает. Предположительно, так проявляет себя карстовая полость.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа выполнена при частичном финансировании по научному проекту РФФИ (грант № 13-05-00374 «Исследование механизмов возбуждения сейсмической и акустической активности флюидонасыщенной среды под внешним воздействием»).

- [1] Николаев А.В., Троицкий П.А., Чеботарева И.Я. Авт. свидетельство Госкомизобретений СССР № 1000962. (1982).
 [2] Чеботарева И.Я., Николаев А.В. Исследование неоднородностей земной коры кода-волнами землнрясейний. ДАН. **364**, №6. С. 816. (1999).
 [3] *Tchebotareva I.I., Nikolaev A.V., Sato H.* Seismic Emission

- Activity of Earth's Crust in Northern Kanto, Japan. PEPI. **120**, № 3. P. 167. (2000).
 [4] Чеботарева И.Я., Кушниц А.Ф., Рожков М.В. Физика Земли. №12. С. 65. (2008).
 [5] Чеботарева И.Я. Физика Земли. № 3. С. 7. (2010).
 [6] Чеботарева И.Я. Физика Земли. № 3. С. 20. (2010).

Monitoring of weak deep emission sources in the presence of intense industrial noise

I. Ya. Chebotareva

*Oil and gas research Institute Russian Academy of Sciences, Gubkina street 3, Moscow 119333, Russia
 E-mail: irinache@inbox.ru*

Previously, algorithms of emission seismic tomography have been developed and tested successfully in geophysical investigations. It was found that intense sources of man-made seismic radiation creates shielding effect and prevents monitoring of weak endogenous sources associated with the process of fluid transport and reaction of the medium to changes in the stress-strain state. The results of numerical simulation and analysis of field data show that special methods of spatial filtering allows us to take the shielding effect of and visualize weak endogenous sources.

Spatial filtering methods because of its features are sensitive to the density of the observing system and its geometry. Under adverse conditions algorithms can lose efficiency. Numerical simulation shows how you can upgrade the small seismic array set on an area of the geodynamic observatory to rectify the situation. It turned out that a slight increase in the number of points of observation and correct their arrangement can completely recover performance of the filter algorithms and ensure the correct operation of the system under intensive man-made interference.

PACS: 91.30.Ab, 93.85.Pq

Keywords: seismic emission tomography, man-made noise, spatial filtering.

Received 13.11.2014.

Сведения об авторе

Чеботарева Ирина Яковлевна — доктор физ-мат наук главный научный сотрудник ИПНГ РАН; тел: +7 (917) 585-81-13, e-mail: irinache@inbox.ru