

Многообразие типов эндогенных сейсмических источников в эмиссионной томографии

И.Я. Чеботарева

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва
E-mail: irinache@inbox.ru

Аннотация. В статье приведены примеры трехмерной локализации методом эмиссионной томографии эндогенных сейсмических источников различной природы. Такими источниками могут быть, помимо микроземлетрясений, природные резонаторы, передающие энергию собственных вибраций через массив горной породы, и структурно-неоднородные объемы горных пород, проявляющие существенную нелинейность по отношению к проходящим сейсмическим волнам. В статье также обсуждается предложенный ранее механизм генерации низкочастотной сейсмической эмиссии на частотах огибающей высокочастотных акустических колебаний и результаты физического моделирования, подтверждающие выводы теории. Эти результаты свидетельствуют о возможности изучения тонких высокочастотных геофизических процессов, протекающих на больших глубинах, с использованием эмиссионной сейсмической томографии при регистрации сейсмической информации на поверхности.

Ключевые слова: сейсмическая эмиссия, горные породы, сейсмическая эмиссионная томография, структурно-неоднородные среды.

Для цитирования: Чеботарева И.Я. Многообразие типов эндогенных сейсмических источников в эмиссионной томографии // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. Вып. 2(25). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-25.art8>

Введение

Микросейсмический мониторинг и эмиссионная сейсмическая томография используют информацию, которую приносят к поверхности Земли слабые сейсмические сигналы эндогенного происхождения. Микросейсмический мониторинг анализирует сигналы от микроземлетрясений, а эмиссионная сейсмическая томография ориентирована на анализ более тонких сейсмических проявлений, что поясняет рис. 1.

Микросейсмический мониторинг к настоящему времени достаточно широко применяется при исследовании территорий нефтяных и газовых месторождений для определения места и времени микроземлетрясений, картирования скоростных структур и разломов, отношений V_P/V_S . Он использует сейсмическую энергию локальной и региональной тектонической активности. Существующие методики позволяют работать с микроземлетрясениями с магнитудой до -2 по шкале Рихтера, то есть проводить исследования в районах, которые не относятся к сейсмоактивным. Последнее время микросейсмический мониторинг широко применяется для мониторинга процесса

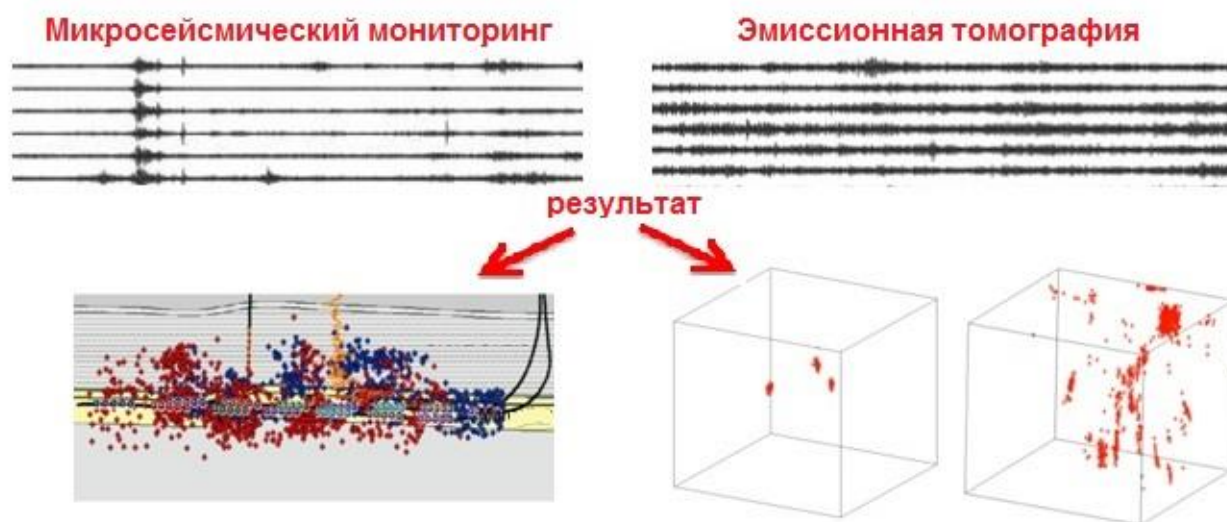


Рис. 1. Иллюстрация к сравнению методов пассивной сейсмологии и эмиссионной сейсмической томографии: сверху – примеры сейсмических записей с полезной информацией, внизу – результат использования конкретного подхода

гидроразрыва пласта. При этом проводятся оценки размеров и азимута инициированной трещины и проницаемости призабойной зоны и пласта [1–6]. При микросейсмическом мониторинге выделяются сигналы отдельных землетрясений и проводится локализация источников традиционными способами – с использованием информации о времени вступлений сейсмических фаз. При этом первые вступления должны четко выявляться на записях после предобработки (см. рис. 1). Сначала по сейсмическим записям для всех событий определяется время каждого из первых вступлений объемных волн. Это сложная и тонкая работа, от которой зависит точность локализации источника микроземлетрясения. При большом числе событий каждое время вступлений определяется в автоматическом режиме с использованием специальных компьютерных программ. После получения этой информации локализуют источник каким-нибудь методом гипоцентрии. Часто используют метод, предложенный Гейгером. В результате микросейсмического мониторинга получают пространственное распределение гипоцентров микроземлетрясений (см. рис. 1).

Эмиссионная сейсмическая томография, хотя и не очень широко еще используется при работах на месторождениях углеводородов, но позволяет изучать гораздо больший набор типов эндогенных сейсмических источников. При использовании эмиссионной сейсмической томографии этап выделения сейсмических фаз отсутствует. Это позволяет локализовать экстремально слабые источники, сигналы от которых полностью погребены

в шуме и не видны на единичных записях. Пример таких записей показан на рис. 1 справа. Они выглядят как шум, но содержат слабый пространственно когерентный сигнал от эндогенных источников, и специальные методы обработки данных позволяют извлекать эту полезную информацию. Распределение источников сейсмического излучения в среде воссоздается с помощью специальных фокусирующих алгоритмов. Посредством такого мониторинга можно не только локализовать области микроразрушений, но и наблюдать процесс их подготовки, а также релаксации напряженно-деформированного состояния среды после микроземлетрясений [7, 8]. При этом область подготовки и релаксации выглядит на изображении как светящееся облако с изменяющейся формой (см. рис. 1). Также эмиссионная томография позволяет изучать медленные изменения напряженно-деформированного состояния геологической среды, при которых диссипация происходит в виде шумоподобного непрерывного эмиссионного излучения и микроземлетрясениями не сопровождается.

Таким образом, эмиссионная томография, в отличие от микросейсмического мониторинга, имеет возможности изучать не только источники импульсных сигналов, возникающих при разрушении горных пород, но и экстремально слабые сейсмические сигналы различного происхождения, в том числе и непрерывные шумоподобные сигналы. В этой статье с использованием экспериментального материала рассмотрены примеры визуализации нескольких типов источников различной природы.

Особенности эмиссионного излучения различной природы

На разрабатываемых месторождениях нефти и газа присутствуют мощные техногенные помехи. Их источники четко визуализируются на сейсмоэмиссионных изображениях. Мощная техногенная помеха, конечно, способна создавать экранирующий эффект и мешать изучению более слабых эмиссионных источников. С экранирующим влиянием техногенного излучения приходится бороться. Для этого разработаны специальные алгоритмы локализации источников с использованием пространственной режекторной и адаптивной фильтрации. Но, как показали полевые исследования, техногенная помеха может полезно использоваться. Она является искусственной «подсветкой» среды и при удачном расположении источника позволяет, например, получать детальные изображения разломных зон до глубин в несколько километров. При этом разломная зона является низкоскоростным волноводом, который захватывает техногенное излучение. Такой природный волновод является несовершенным, имеет

переменную толщину и достаточно прозрачные стенки, что приводит к излучению через стенки волновода захваченной сейсмической энергии, и волновод становится видимым на сейсмоэмиссионных изображениях геосреды.

Техногенное излучение позволяет визуализировать и положение скважины. В левой части рис. 2 показано изображение устья и примыкающего к нему шумящего верхнего участка скважины при процессе поднятия колонн. На эмиссионных изображениях четко визуализируются по всей длине и шумящие фонтанирующие скважины с сильным притоком нефти. Источником излучения в этом случае является гидродинамический шум, который передается в среду через стенки скважины. При этом вблизи забоя скважины активизируется и становится «видимым» эмиссионное излучение из зоны притока с активной фильтрацией флюида.

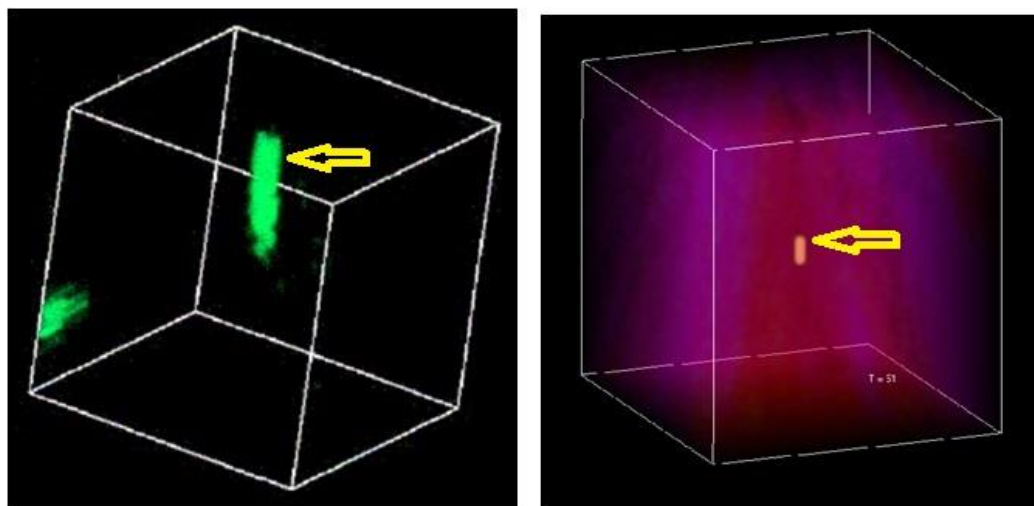


Рис. 2. Сейсмоэмиссионные изображения глубинных источников: слева – изображение устья и примыкающего к нему шумящего верхнего участка скважины при процессе поднятия колонн; справа – изображение работающего бурового инструмента на глубине 2 км, верхняя грань соответствует глубине 1.4 км; размер ребра вмещающего куба 1.2 км

В правой части рис. 2 показано изображение другого типа источников – изображение работающего бурового инструмента. Хотя этот источник связан с техногенным воздействием на среду, но он имеет другую природу сейсмического сигнала. В этом случае эндогенный сейсмический сигнал определяется процессом разрушения горной породы при бурении. Это роднит такой тип источника с микроземлетрясениями, пример локализации которых методом эмиссионной томографии был приведен на рис. 1.

На рис. 3 показан пример использования эмиссионной томографии при мониторинге гидроразрыва пласта. В данном случае на изображениях среды визуализируются не техногенные, а глубинные эмиссионные источники, связанные с геодинамическими процессами в массиве пород. Зона перфорации располагалась в центре исследуемого объема среды. Волновое поле регистрировалось на поверхности плотной площадной расстановкой вертикальных сейсмологических датчиков. Изображения среды были получены для записей сейсмического фона до гидроразрыва, во время проведения работ и после гидроразрыва, после релаксации напряжений в среде.

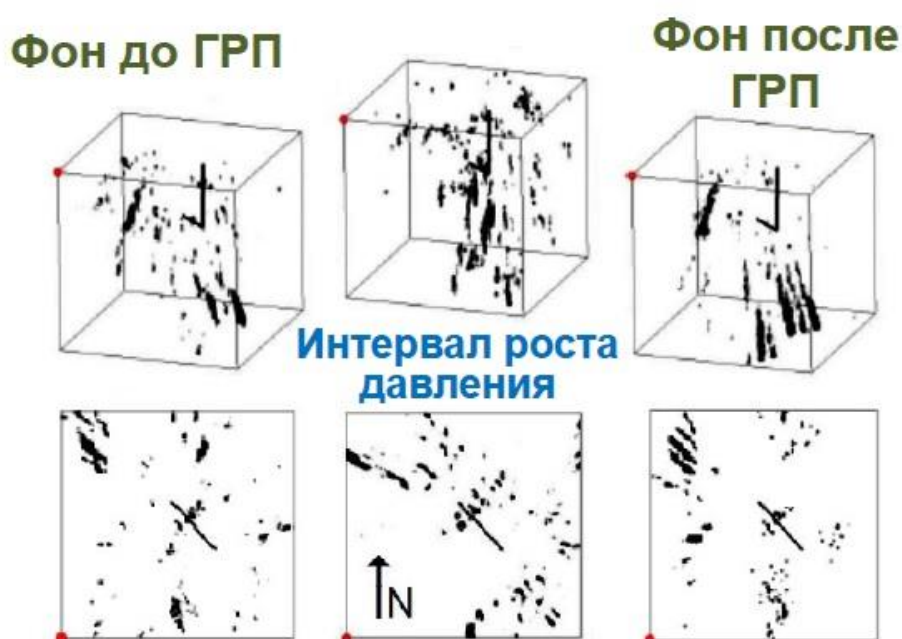


Рис. 3. Изображения эмиссионных источников до, после гидроразрыва пласта, а также в период времени увеличения давления в процессе закачки жидкости в пласт: сверху – трехмерные изображения, внизу – горизонтальные проекции; размер ребра куба 3 км

Оказалось, что распределение эмиссионных источников в разных частотных диапазонах существенно отличается. Анализ полученных сейсмоэмиссионных изображений показал, что в среднем диапазоне частот (см. рис. 3) визуализируется эмиссионная активность в области природной трещиноватости и области гидравлического разрушения. До начала работ существует фоновое распределение источников сейсмической эмиссии, которое определяется локализацией повышенной природной трещиноватости и динамикой фоновых деформационных процессов в массиве пород. Внешнее воздействие в период роста давления при закачке жидкости в пласт сильно

изменяет пространственное распределение эмиссионных источников и увеличивает мощность излучения в радиусе более 2 км от зоны перфорации. Однако, после снятия воздействия распределение эмиссионных источников возвращается к фоновому состоянию.

Приведенные на рис. 3 результаты позволяют сделать, по крайней мере, два вывода. Первый – дополнительное внешнее воздействие позволяет выявлять геологические объекты, невидимые в фоновом состоянии. То есть, например, при гидроразрыве пласта можно попутно проводить доразведку месторождения в радиусе нескольких километров. Вторым результатом не менее интересным – вид распределений эмиссионных источников является обратимым, поэтому разрушение пород не может быть определяющим механизмом сейсмической эмиссии.

Действительно, экспериментальные результаты говорят о том, что представление о сейсмической эмиссии как о наложении большого числа микроземлетрясений является не корректным. Простые оценки показывают [7], что для тех частот, при которых получают эмиссионные изображения при гидроразрыве, размеры множественных трещин должны быть очень большие, несколько десятков метров, что не соответствует реальности. Более реалистичным является представление о сейсмической эмиссии как о нелинейном отклике массива горных пород на внешнее воздействие, при котором может происходить переброс энергии с одних частот на другие и трансформация энергии одних физических полей в другие. Существует несколько моделей сейсмической эмиссии, которые описывают генерацию и перенос по спектру в виде гармоник и субгармоник энергии эмиссионного излучения [9–13]. Одна из новых нелинейных моделей генерации сейсмической эмиссии предложена в ИПНГ РАН [8]. Согласно этой модели существует механизм генерации сейсмической эмиссии на частотах огибающей высокочастотных акустических колебаний, генерируемых в геосреде. Соотношение частот сейсмических и высокочастотных акустических колебаний зависит от параметров среды и амплитуды акустического излучения и может составлять несколько порядков. В работе [8] использована модель среды в виде одномерных силовых цепочек с герцевской нелинейностью. Подобная модель экспериментально обоснована и широко используется в геофизике. Поясним ее более подробно.

В прошлом веке в геофизике сформировалось понятие «геосреда», которое используется для описания свойств верхней части литосферы – коры и верхней части

мантии до астеносферы [14–19]. Геосреда рассматривается как открытая неравновесная нелинейная динамическая система, параметры которой изменяются во времени. Также для геосреды характерно дискретное блоковое строение с иерархической системой преимущественных размеров. При описании деформирования такой среды необходимо учитывать ротационную динамику фрагментов горной породы, что возможно, например, с помощью механики Коссера [20]. Этот подход позволяет описать ряд природных процессов, наблюдаемых в горных породах [21], интерпретацию которых в рамках модели сплошной среды сделать не удастся. Дальнейшее развитие описание деформирования горных пород нашло в физической мезомеханике структурно-неоднородных сред [22–26]. В ней геосреда рассматривается как многоуровневая самоорганизующаяся система. На каждом масштабном уровне процесс деформирования развивается согласно своим особенностям, но между процессами на различных уровнях существует взаимосвязь. При этом формируются диссипативные субструктуры как результат многоуровневой самоорганизации системы мезообъемов в соответствии с заданными граничными условиями. В обобщенном смысле по отношению к горным породам мезомеханика – это механика гранулированных сред. Под гранулированной средой понимается совокупность большого числа твердых отдельных частиц, промежутки между которыми заполнены более «мягким» веществом – флюидом, водой, воздухом и пр. [27]. Каждая гранула может быть конгломератом твердых частиц, но более «жестко» связанных, чем связи через «мягкое» заполняющее вещество. Модель гранулированных сред в геологии применима не только к рыхлым и сыпучим образованиям, но и к описанию условно монолитных зернистых и кристаллических пород [28, 29]. По своим свойствам гранулированные среды во многом отличаются от твердых тел, жидкости и газа. Из-за наличия «мягких контактов» гранулированные среды обладают ярко выраженной нелинейностью. Также важное характерное свойство гранулированных сред состоит в том, что при нагружении и вибровоздействии в них формируется трехмерная сетка силовых цепочек, что удается наглядно наблюдать с использованием фотоупругих материалов [30]. На рис. 4. в зависимости от интенсивности напряжения материала шарики светятся различным светом. Голубой цвет отмечает положение ненагруженных шариков. При воздействии на объем, заполненный гранулированной средой, создается сложная структура силовых цепочек, в которой напряжения сильно варьируются от одной позиции к другой. Передача напряжений осуществляется не равномерно по объему, а по некой сетке, образованной

нагруженными цепочками частиц. Эта сетка держит всю нагрузку. Среда внутри ячеек сетки не испытывает нагрузки, в то время как нагрузка на стыках зерен силовых цепочек может быть очень велика.

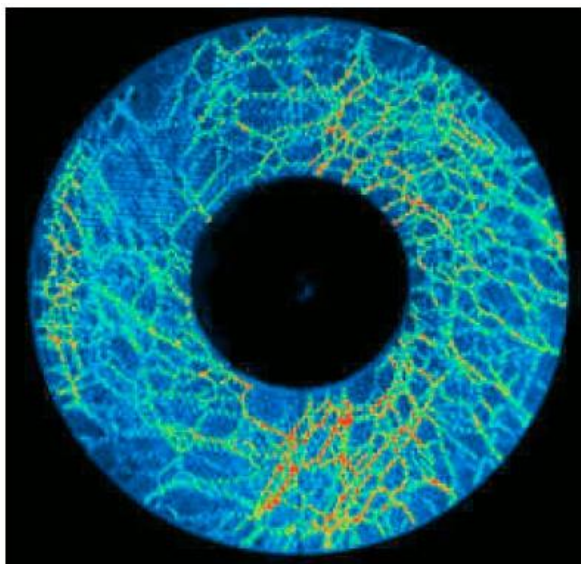


Рис. 4. Визуализация с использованием оптически активных материалов «паутины» силовых цепочек, возникающих при ультразвуковом воздействии на гранулированные среды [30]

Аналитически исследовать уравнение движения сложной пространственной сетки силовых цепочек не представляется возможным. Однако интересные и важные результаты можно получить из анализа уравнений движений одномерных цепочек, составляющих сетку. В работе [8] для модели среды в виде одномерных силовых цепочек с герцевской нелинейностью методом многомасштабных разложений получены уравнения движения типа нелинейного уравнения Шредингера (НУШ). Решение таких уравнений, при определенном соотношении параметров среды, описывает модуляционную неустойчивость, которая состоит в развитии низкочастотной модуляции высокочастотной несущей волны. В результате детектирования модулированного сигнала при распространении в нелинейной среде остается только низкочастотное излучение [31] и из объема среды идет генерация низкочастотных сейсмических волн.

Из модели, предложенной и описанной в работе [8], следует, что в иерархически устроенных структурно-неоднородных средах, к которым относятся и горные породы, может формироваться набор генетически связанных диапазонов частот, значительно разнесенных по спектру, но имеющих сходную временную динамику. А также то, что процессы, протекающие на микроуровне и сопровождаемые генерацией высокочастотного

акустического излучения (десятки кГц и более) можно изучать с использованием эмиссионной сейсмической томографии с регистрацией на поверхности связанного сейсмического излучения в диапазоне единиц и десятков Гц.

Эксперименты по физическому моделированию подтверждают выводы теории [8]. С использованием кернов горных пород нефтяных месторождений Западной Сибири были проведены эксперименты по физическому моделированию нагружения и вибровоздействия на горные породы [32]. Эксперименты проводились при трехмерном обжати кернов и имитации РТ-условий, характерных для природного массива на глубине 2–3 км. Регистрация акустических колебаний проводилась высокочувствительным акселерометром в диапазоне частот 1–20000 Гц. Вибровоздействие проводилось на частоте 18 кГц. На рис. 5 и 6 приведены результаты, полученные в работе [32], – спектры зарегистрированного фонового акустического излучения на поверхности керна до воздействия и после окончания опытов с воздействием. Для удобства восприятия на рис. 6 показаны изображения в «позитиве» и «негативе», то есть с переменной окраски меток.

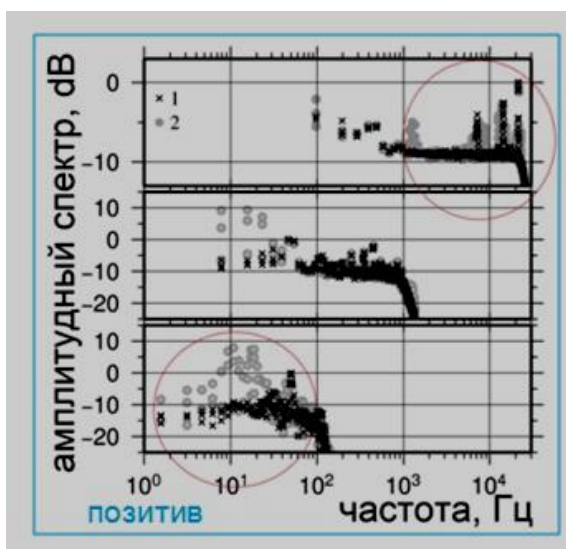


Рис. 5. Спектр акустических фоновых колебаний до (1) и после (2) повышения давления

В работе [32] было экспериментально показано, что при нагружении керна и высокочастотном вибровоздействии синхронно увеличивается уровень шума в нижнем (1–100 Гц) и верхнем (5–20 кГц) диапазонах частот. Также показано, что при этом временная динамика структуры фона в верхнем и нижнем диапазонах коррелируется, но полностью отличается от динамики среднего диапазона частот. Для количественной характеристики временной динамики структуры фонового шума был использован

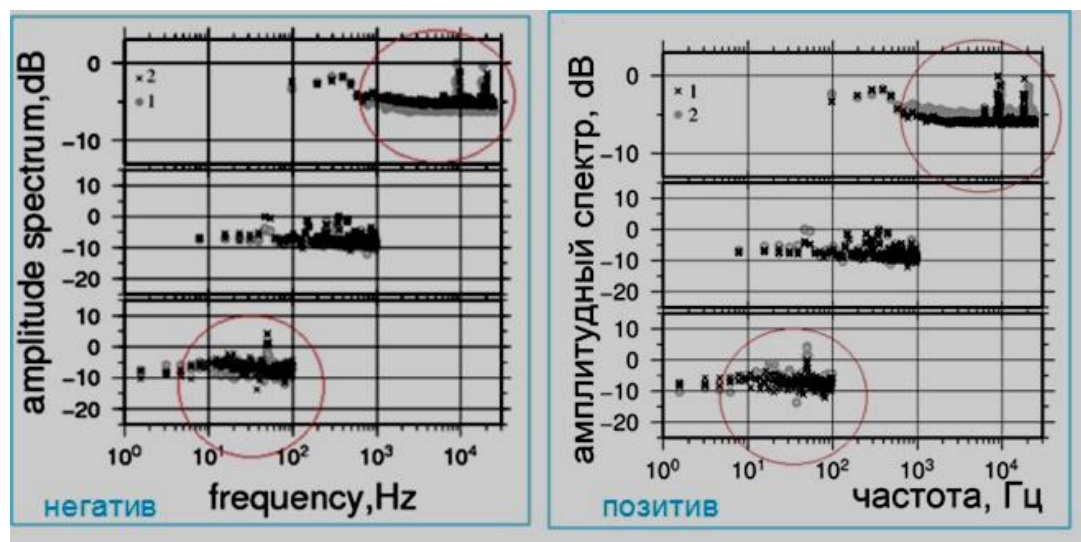


Рис. 6. Спектр акустических фоновых колебаний до (1) и после (2) повышения давления

индикатор степени упорядоченности колебаний, который дает количественную информацию о росте степени упорядоченности или степени хаотизации колебаний [32]. Надо подчеркнуть, что наблюдаемый в экспериментах эффект согласуется с механизмом генерации сейсмической эмиссии, предложенным в работе [8], но не объясняется другими механизмами генерации сейсмической эмиссии по работам [9–13].

Заключение

Эмиссионная сейсмическая томография позволяет локализовать по наблюдениям на поверхности глубинные источники сейсмического излучения различной природы и получить их трехмерные изображения. Такими источниками могут быть, например, шумящие скважины и природные резонаторы, передающие энергию собственных вибраций через массив горной породы. Это могут быть источники микроземлетрясений, связанные с разрушением породы и сдвигом бортов трещин. Также это могут быть источники, связанные с нелинейной трансформацией упругой энергии в объемах среды с сильной структурной неоднородностью пород. Теоретические и экспериментальные результаты, обсуждаемые в данной статье, свидетельствуют о том, что эмиссионная томография может быть эффективно использована для мониторинга малоэнергетичных тонких акустических процессов, протекающих на больших глубинах – десятки километров и более. Эмиссионная томография, таким образом, имеет большой потенциал

для контроля состояния горных пород в широком диапазоне глубин, а также для разведки и мониторинга разработки месторождений полезных ископаемых.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой промышленности (фундаментальные, поисковые и прикладные исследования)», № АААА-А19-119013190038-2).

Литература

1. *Economides M., Oligney R., Valko P.* Unified fracture design. Bridging the gap between theory and practice. Alvin. Texas: Orsa Press, 2002. 262 p.
2. *Maxwell S.* Microseismic: growth born from success // *The Leading Edge*. 2010. Vol. 29, No. 3. P. 338–343. <https://doi.org/10.1190/1.3353732>
3. *Maxwell S., Deere J.* An introduction to this special section: microseismic // *The Leading Edge*. 2010. Vol. 29, No. 3. P. 277. <https://doi.org/10.1190/1.3353722>
4. *Eisner L., Williams Stroud S., Hill A., Duncan P., Thornton M.* Beyond the dots in the box: microseismicity constrained fracture models for reservoir simulation // *The Leading Edge*. 2010. Vol. 29, No. 3. P. 326–333. <https://doi.org/10.1190/1.3353730>
5. *Shapiro S.A., Rothert E., Rath V., Rindschwentner J.* Characterization of fluid transport properties of reservoirs using induced microseismicity // *Geophysics*. 2002. Vol. 67, No. 1. P. 212–220. <https://doi.org/10.1190/1.1451597>
6. *Rothert E., Shapiro S.A.* Statistics of fracture strength and fluid-induced microseismicity // *Journal of Geophysical Research*. 2007. Vol. 112, No. B04. P. 1–16. <https://doi.org/10.1029/2005JB003959>
7. *Чеботарева И.Я.* Эмиссионная сейсмическая томография – инструмент для изучения трещиноватости и флюидодинамики Земной коры // *Георесурсы*. 2018. Т. 20, № 3. Ч. 2. С. 238–245. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.3.238-245>
8. *Володин И.А., Чеботарева И.Я.* Сейсмическая эмиссия в зонах техногенных воздействий // *Акустический журнал*. 2014. Т. 60, № 5. С. 505–517. <https://doi.org/10.7868/S0320791914050141>
9. *Бовенко В.Н.* Автоколебательная модель акустоэмиссионных и сейсмических явлений // *Доклады АН СССР*. 1987. Т. 297, № 5. С. 1103–1106.

10. Крылов А.Л., Николаевский В.Н., Эль Г.А. Математическая модель нелинейной генерации ультразвука сейсмическими волнами // Доклады АН СССР. 1991. Т. 318, № 6. С. 1340–1344.
11. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996. 448 с.
12. Гарагаш И.А. Модель динамики фрагментированных сред с подвижными блоками // Физическая мезомеханика. 2002. Т. 5, № 5. С. 71–77. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2002-00018>
13. Сибиряков Б.П., Бобров Б.А. О природе возникновения акустической эмиссии при статическом нагружении песков // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11, № 1. С. 80–84. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2008-00065>
14. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 100 с.
15. Садовский М.А., Писаренко В.Ф., Родионов В.Н. От сейсмологии к геомеханике. О модели геофизической среды // Вестник АН СССР. 1985. № 1. С. 82–88.
16. Николаев А.В. Проблемы нелинейной сейсмики // Проблемы нелинейной сейсмики: Сб. ст. / Отв. ред. А.В. Николаев, И.Н. Галкин. М.: Наука, 1987. С. 5–20.
17. Проблемы геофизики XXI века: Сб. науч. тр. / Отв. ред. А.В. Николаев. В 2-х кн. М.: Наука, 2003. 644 с.
18. Лукк А.А., Дещеревский А.В., Сидорин А.Я., Сидорин И.А. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. М.: ИОФЗ РАН, 1996. 210 с.
19. Курленя М.В., Миренков В.Е., Сердюков С.В. Взгляд на природу напряженно-деформированного состояния недр Земли и техногенные динамические явления // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 8. С. 5–19.
20. Cosserat E., Cosserat F. Theorie des corps deformables. Paris: Librairie Scientifique A. Hermann et Fils. 1909. 226 p.
21. Гарагаш И.А., Николаевский В.Н. Механика Коссера для наук о земле // Вычислительная механика сплошных сред. 2009. Т. 2, № 4. С. 44–66. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2009.2.4.31>
22. Панин В.Е. Основы физической мезомеханики // Физическая мезомеханика. 1998. Т. 1, № 1. С. 5–22. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-1998-00015>

23. Панин В.Е. Синергетические принципы физической мезомеханики // Физическая мезомеханика. 2000. Т. 3, № 6. С. 5–36. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2000-00040>
24. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В., Моисеенко Д.Д. Природа локализации пластической деформации твердых тел // Журнал технической физики. 2007. Т. 77, № 8. С. 62–69.
25. Макаров П.В. Нагружаемый материал как нелинейная динамическая система. Проблема моделирования // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8, № 6. С. 39–56.
26. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Стефанов Ю.П., Кузнецов П.В., Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Ворошилов С.П., Ворошилов Я.С. Нелинейная механика геоматериалов и геосред. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2007. 235 с.
27. Cambell C.S. Rapid granular flows // Annual Review of Fluid Mechanics. 1990. No. 22. P. 57–92. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.22.010190.000421>
28. Леонов М.Г. О тектонической деформации гранулированных геологических сред // ДАН. 1997. Т. 353, № 1. С. 79–82.
29. Леонов М.Г. Тектоника сложнодислоцированных объемов земной коры (проблемы и решения) // Литосфера. 2002. № 1. С. 3–22.
30. Jia X., Caroli C., Velicky B. Ultrasound propagation in externally stressed granular media // Physics Review Letters. 1999. Vol. 82, No. 9. P. 1863–1866. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.82.1863>
31. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. 1966. М.: Наука. 519 с.
32. Чеботарева И.Я., Володин И.А., Дрягин В.В. Акустические эффекты при деформировании структурно-неоднородных сред // Акустический журнал. 2017. Т. 63, № 1. С. 84–93. <https://doi.org/10.7868/S0320791916060046>

Variety of types of endogenous seismic sources in emission tomography

I.Ya. Chebotareva

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

E-mail: irinache@inbox.ru

Abstract. The article provides examples of 3D imaging of endogenous seismic sources of various nature obtained by the method of emission tomography. Besides microearthquakes, such sources include natural resonators, transmitting the energy of their own vibrations through the rock mass, as well as structurally inhomogeneous volumes of rocks, showing a significant non-linearity with respect to the passing seismic wave. The article also discusses the previously proposed mechanism of low-frequency seismic emission generation at envelope frequencies of high-frequency acoustic oscillations. The results of physical modeling confirm the conclusions of the theory. These results suggest that it is possible to study fine high-frequency geophysical processes occurring at great depths using emission seismic tomography when seismic information is recorded on the surface.

Keywords: seismic emission, rocks, seismic emission tomography, structurally inhomogeneous media.

Citation: *Chebotareva I.Ya.* Variety of types of endogenous seismic sources in emission tomography // Actual Problems of Oil and Gas. 2019. Iss. 2(25). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-25.art8> (In Russ.)

References

1. *Economides M., Oligney R., Valko P.* Unified fracture design. Bridging the gap between theory and practice. Alvin. Texas: Orsa Press, 2002. 262 p.
2. *Maxwell S.* Microseismic: growth born from success // *The Leading Edge*. 2010. Vol. 29, No. 3. P. 338–343. <https://doi.org/10.1190/1.3353732>
3. *Maxwell S., Deere J.* An introduction to this special section: microseismic // *The Leading Edge*. 2010. Vol. 29, No. 3. P. 277. <https://doi.org/10.1190/1.3353722>
4. *Eisner L., Williams Stroud S., Hill A., Duncan P., Thornton M.* Beyond the dots in the box: microseismicity constrained fracture models for reservoir simulation // *The Leading Edge*. 2010. Vol. 29, No. 3. P. 326–333. <https://doi.org/10.1190/1.3353730>
5. *Shapiro S.A., Rothert E., Rath V., Rindschwentner J.* Characterization of fluid transport properties of reservoirs using induced microseismicity // *Geophysics*. 2002. Vol. 67, No. 1. P. 212–220. <https://doi.org/10.1190/1.1451597>
6. *Rothert E., Shapiro S.A.* Statistics of fracture strength and fluid-induced microseismicity // *Journal of Geophysical Research*. 2007. Vol. 112, No. B04. P. 1–16.

7. *Chebotareva I.Ya.* Emission seismic tomography – the tool to study fracturing and fluidodynamics of the Earth crust // *Georesursy*. 2018. Vol. 20, No. 3. Part 2, P. 238–245. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.3.238-245>
8. *Volodin I.A., Chebotareva I.Ya.* Seismic emission in technological impact zones // *Acoustical Physics*. 2014. Vol. 60, No. 5. P. 543–554. <https://doi.org/10.1134/S1063771014050145>
9. *Bovenko V.N.* Self-oscillatory model of acoustoemission and seismic phenomena // *Dokl. Akad. Nauk*. 1987. Vol. 297, No. 5. P. 1103-1106. (In Russ.).
10. *Krylov A.L., Nikolaevskiy V.N., Ehl' G.A.* Mathematical model of nonlinear generation of ultrasound by seismic waves // *Dokl. Akad. Nauk*. 1991. Vol. 318, No. 6. P. 1340–1344. (In Russ.).
11. *Nikolaevskiy V.N.* Geomechanics and fluidodynamics. Moscow: Nedra, 1996. 448 p. (In Russ.).
12. *Garagash I.A.* Model of dynamics of fragmented media with movable blocks // *Fiz. Mezomekh*. 2002. Vol. 5, No. 5. P. 71–77.
13. *Sibiryakov B.P., Bobrov B.A.* Origin of acoustic emission under static loading of sands // *Fiz. Mezomekh*. 2008. Vol. 11, No. 1. P. 80–84. (In Russ.).
14. *Sadovskii M.A., Bolkhovitinov L.G., Pisarenko V.F.* Deformation of geophysical medium and seismic process. Moscow: Nauka, 1987. 100 p. (In Russ.).
15. *Sadovskii M.A., Pisarenko V.F., Rodionov V.N.* From seismology to geomechanics. About the geophysical environment model // *Vestnik Akad. Nauk SSSR*. 1985. No. 1. P. 82–88. (In Russ.).
16. *Nikolaev A.V.* Problems of nonlinear seismic // *Problems of nonlinear seismic* / Ed. A.V. Nikolaev, I.N. Galkin. Moscow: Nauka, 1987. P. 5–20. (In Russ.).
17. *Problems of geophysics of 21st Century* / Ed. A.V. Nikolaev. Moscow: Nauka, 2003. In 2 books, 644 p. (In Russ.).
18. *Lukk A.A., Deshcherevsky A.V., Sidorin A.Ya., Sidorin I.A.* Variations of geophysical fields as determined chaos in fractal medium. Moscow: IOFZ RAN, 1996. 210 p. (In Russ.).
19. *Kurlenya M.V., Mirenkov V.E., Serdyukov S.V.* A look at the nature of the stress-induced state of the Earth's interior and man-made dynamic phenomena // *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2008. No. 8. P. 5–19. (In Russ.).

20. *Cosserat E., Cosserat F.* Theorie des corps deformables. Paris: Librairie Scientifique A. Hermann et Fils. 1909. 226 p.
21. *Garagash I.A., Nikolaevskiy V.N.* Cosserat mechanics for Earth sciences // Computational Continuum Mechanics. 2009. Vol. 2, No. 4. P. 44–66. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2009.2.4.31> (In Russ.).
22. *Panin V.E.* Fundamentals of physical mesomechanics // Fiz. Mezomekh. 1998. Vol. 1, No. 1. P. 5–22. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-1998-00015> (In Russ.).
23. *Panin V.E.* Synergetic principles of physical mesomechanics // Fiz. Mezomekh. 2000. Vol. 3, No. 6. P. 5–36. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2000-00040> (In Russ.).
24. *Panin V.E., Egorushkin V.E., Panin A.V., Moiseenko D.D.* On the nature of plastic strain localization in solids // Technical Physics. 2007. Vol. 52, No. 8. P. 1024–1030. <https://doi.org/10.1134/S1063784207080105>
25. *Makarov P.V.* Loaded material as a nonlinear dynamic system. Simulation problems // Fiz. Mezomekh. 2005. Vol. 8, No. 6. P. 39–56. (In Russ.).
26. *Makarov P.V., Smolin I.Yu., Stefanov Yu.P., Kuznetsov P.V., Trubitsyn A.A., Trubitsyna N.V., Voroshilov S.P., Voroshilov Ya.S.* Nonlinear mechanics of geomaterials and geomedia. Novosibirsk: Geo, 2007. 235 p. (In Russ.).
27. *Cambell C.S.* Rapid granular flows // Annual Review of Fluid Mechanics. 1990. No. 22. P. 57–92. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.22.010190.000421>
28. *Leonov M.G.* Tectonic deformations of granular geological mediums // Transactions (Doklady) of the Russian Academy of Sciences. Earth Science Section. 1997. Vol. 353, No. 2. P. 212–215.
29. *Leonov M.G.* Tectonic analysis of intensive dislocated rock masses of the Earth crust (problems and resolutions) // Lithosphere. 2002. No. 1. P. 3–22. (In Russ.).
30. *Jia X., Caroli C., Velicky B.* Ultrasound propagation in externally stressed granular media // Physics Review Letters. 1999. Vol. 82, No. 9. P. 1863–1866. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.82.1863>
31. *Zarembko L.K., Krasilnikov V.A.* Introduction to nonlinear acoustics. 1966. Moscow: Nauka, 519 p. (In Russ.).
32. *Chebotareva I.Ya, Volodin I.A., Dryagin V.V.* Acoustic effects in the deformation of structurally inhomogeneous media // Acoustical Physics. 2017. Vol. 63, No. 1. P. 86–94. <https://doi.org/10.1134/S106377101606004X>