

Эмиссионная сейсмическая томография – инструмент для изучения трещиноватости и флюидодинамики земной коры

И.Я. Чеботарева

Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия

E-mail: irinache@inbox.ru

В статье приведены результаты сейсмотомографического мониторинга эмиссионных источников, связанных с зонами открытой трещиноватости, тектоническими нарушениями и фильтрацией флюида в высокопроницаемых породах. Показано, что геодинамические процессы, обусловленные наличием таких неоднородностей, можно изучать с использованием многоканальных записей естественного сейсмического шума Земли, зарегистрированного на дневной поверхности. Носителем полезной информации является экстремально слабая пространственно когерентная составляющая сейсмического волнового поля – сейсмическая эмиссия, порожденная в энергонасыщенных зонах природного массива фоновыми деформациями. Дополнительное внешнее техногенное и природное воздействие активизирует латентные области геофизических неоднородностей, что выявляет новые эмиссионные объекты, скрытые в фоновом состоянии. Это позволяет, например, при гидроразрыве пласта попутно проводить доразведку месторождения в радиусе нескольких километров.

В статье также затронуты вопросы истории открытия явления сейсмической эмиссии и механизма генерации низкочастотной ветви эмиссии как результата амплитудной неустойчивости огибающих высокочастотных акустических колебаний элементов геологической среды. Низкочастотная эмиссия (1-100 Гц) обеспечивает возможность дистанционного изучения эмиссионных высокочастотных (единицы-сотни кГц) осцилляций в энергонасыщенных зонах, расположенных на большом удалении от места регистрации.

Ключевые слова: эмиссионная сейсмическая томография, сейсмическая эмиссия, структурно неоднородные среды, нефтяное и газовое месторождение

Для цитирования: Чеботарева И.Я. (2018). Эмиссионная сейсмическая томография – инструмент для изучения трещиноватости и флюидодинамики земной коры. *Георесурсы*, 20(3), Ч.2, с. 238-245. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2018.3.238-245>

Введение

Явление эндогенной сейсмической эмиссии официально было зарегистрировано в качестве открытия в 80-х годах прошлого века. Авторами открытия являются Л.Н. Рыкунов, О.Б. Хаврошкин, В.В. Циплаков (Рыкунов и др., 1983), хотя экспериментально подкрепленные предположения о существовании слабых глубинных сейсмических источников, связанных с деформационными процессами в коре Земли, публиковались и ранее другими авторами, начиная еще с позапрошлого века (Дарвин, 1965; Голицын, 1960; Гамбургцев, 1960; Nanney, 1958; Жадин, 1971; Гордеев, Рыкунов, 1976; Науменко, 1979; Leet, Leet, 1962). Однако авторам открытия надо отдать должное в стойком отстаивании своих научных позиций и факта существования эффекта. Результаты работ Л.П. Рыкунова, О.Б. Хаврошкина и В.В. Цыплакова породили бурную научную дискуссию. Оппоненты пытались опровергнуть факт существования сейсмической эмиссии, в том числе и экспериментально (Гальперин и др., 1987). Противоречивость первых экспериментов связана с несовершенством и различием аппаратуры, методов и методик исследований. Также и с тем, что изучаемое явление очень сложно по своей пространственно-временной структуре и интенсивность эндогенного эмиссионного излучения очень мала. Она часто была на грани чувствительности использованных регистраторов.

Сама идея существования эффекта сейсмической эмиссии совершенно не укладывалась в рамки классических представлений механики сплошных сред и представлений о том, что естественный шум Земли формируется исключительно множественными поверхностными источниками. Споры постепенно стихли по мере развития новой модели литосферы как геосреды, которая является открытой неравновесной нелинейной динамической системой, проявляющей изменчивость параметров, с иерархично-блочной структурой и энергонасыщенностью (Лукк и др., 1996). Также по мере совершенствования аппаратуры и методов обработки данных появились множественные экспериментальные результаты подтверждающие существование сейсмической эмиссии, которые опровергнуть было уже невозможно.

Тем не менее, уже на первом этапе, с использованием одноканальных узкополосных регистраторов, авторам открытия удалось экспериментально доказать (Хаврошкин, 1999), что высокочастотный сейсмический шум ($f > 1$ Гц) модулируется различными деформационными процессами, такими как лунно-солнечные приливы, штормовые микросейсм, волны от удаленных сильных землетрясений и взрывов, собственные колебания Земли и пр. В сейсмоактивных регионах были обнаружены (Хаврошкин, 1999) характерные особенности высокочастотных шумов, появляющиеся на времени подготовки землетрясений и на стадии релаксации напряжений в коре Земли после землетрясений. Авторы открытия объяснили эти эффекты

существованием эндогенных источников сейсмической эмиссии, которая является компонентой естественного сейсмического фона Земли. Они высказали предположение, что источники эмиссии связаны с разномасштабными структурно-геологическими и энергетическими (концентрации напряжений, термические градиенты) неоднородностями, а интенсивность излучения контролируется внешними низкочастотными деформационными воздействиями. И действительно, последующие прямые скважинные наблюдения показали, что повышение уровня сейсмического и акустического шума соответствует интервалам дробления и повышенной трещиноватости, активных микродвижений земной коры, а также тектоническим нарушениям и разломами (Дьяконов и др., 1989; Дьяконов и др., 1991; Дьяконов и др., 2010; Diakonov et al., 1990; Астраханцев и др., 2007). В частности, было показано, что повышение уровня шума и его вариаций соответствует положению рудных интервалов и нефтяного коллектора (Дьяконов и др., 1989; Атлас временных вариаций..., 1994). При сейсморазведочных работах было обнаружено появление в районе залежи углеводородов наведенных геодинамических шумов в полосе частот до 40 Гц (Максимов и др., 2015). В результате большого числа экспериментальных работ было установлено, что регистрируемая эмиссионная сейсмическая активность не стабильна во времени и в пространстве, обладает избирательной чувствительностью к частоте воздействия, причем эмиссионный отклик может отличаться по частоте от воздействия (Хаврошкин, 1999).

Сигналы сейсмической эмиссии могут иметь различный вид (Хаврошкин, 1999), но часто они представлены импульсными или шумоподобными временными зависимостями. Сигналы от множественных источников могут накладываться при регистрации и интерферировать. Более того, эмиссионные сигналы могут быть экстремально слабыми, полностью погребенными в шуме на единичных записях. Источники таких сигналов невозможно локализовать стандартными сейсмологическими методами, базирующимися на определении времен вступлений сейсмических фаз от микрособытий. Для исследования сейсмической эмиссии был предложен и запатентован специальный метод, получивший со временем название эмиссионная сейсмическая томография (Николаев и др., 1983). Он позволяет выделить пространственно когерентную составляющую сейсмического шума, локализовать ее источники, оценить параметры излучения (мощность, спектральный состав) (Chebotareva, 2011; Чеботарева, 2012; Tchebotareva et al., 2000).

Входными данными для эмиссионной томографии являются шумоподобные сейсмические записи, зарегистрированные многоканальной площадной группой датчиков. Это могут быть записи естественного сейсмического шума Земли, кода – волны удаленных землетрясений и взрывов, техногенный шум. Регистрирующие датчики располагаются на поверхности или в скважинах. Даже небольшое заглубление датчиков, на первые десятки метров, полезно и позволяет на порядок снизить уровень локального случайного шума и увеличить чувствительность метода. При реализации алгоритмов, посредством введения временных задержек сигнала, сейсмическая антенна настраивается на усиление сигналов из различных точек

среды. Затем рассчитывается функционал, обеспечивающий накопление информации по каналам и по времени. Положение эмиссионных источников соответствует положению максимумов функционала, которые превышают значение доверительного интервала чисто шумового поля (Chebotareva, 2011; Чеботарева, 2012; Tchebotareva et al., 2000). Таким образом, если эмиссионные источники отсутствуют, то мы получим изображение с равномерным распределением интенсивности, статистический разброс значений яркости определяется временем накопления сигнала. Если в геосреде присутствуют источники сейсмической эмиссии, то в изображении появится яркое “облако”, очертания которого определяются геометрией излучающей эмиссионной области.

Эмиссионная томография первоначально использовалась для сейсмологических исследований в геотермальных, сейсмоактивных и вулканических районах. Были разработаны алгоритмы с реализацией во временной и частотной области, для однокомпонентной и трехкомпонентной регистрации, позволяющие работать в широком диапазоне пространственных масштабов, вплоть до глубокой литосферы Земли (Chebotareva, 2011; Чеботарева, 2012; Чеботарева, 2017; Tchebotareva et al., 2000). Адаптация эмиссионной томографии для работ на месторождениях углеводородов потребовала разработки дополнительных алгоритмов, позволяющих устранять влияние интенсивной пространственно когерентной техногенной помехи (Chebotareva et al., 2008; Chebotareva, 2010a; Chebotareva, 2010b). Также были разработаны приближенные алгоритмы трассировки лучей, позволяющие существенно ускорить время расчетов для горизонтально-слоистых, градиентных скоростных моделей и моделей слоистых сред со сложной геометрией границ. Корректный учет скоростной модели позволяет повысить чувствительность метода и сделать более точную трехмерную привязку эмиссионных источников (Chebotareva, 2018).

Эмиссионная сейсмическая томография, несмотря на ее большой потенциал, еще недостаточно задействована при разработке месторождений углеводородов. В нашей стране есть работы по использованию различных модификаций метода для мониторинга гидроразрыва пласта и отработки методов извлечения геологической информации с использованием атрибутов эмиссионных и рассеянных волн (Гапеев и др., 2014; Александров и др., 2015; Кузнецов и др., 2016). За рубежом эмиссионная томография также успешно применяется сервисными компаниями для мониторинга гидроразрыва и высокоактивных зон разломов. Примерами таких компаний могут служить MicroSeismic, Inc. и Global Geophysical Services, Inc.

Так как эмиссионная томография способна работать не только с импульсными, но и шумоподобными сигналами, она позволяет извлекать более богатую информацию, чем микросейсмический мониторинг: изучать не только микрособытия, но и более слабые по энергетике диссипативные процессы при деформировании среды, которые не сопровождаются микроземлетрясениями. В данной статье приведены примеры по выявлению и трехмерной локализации источников эмиссионной активности, связанных с тектоническими нарушениями, открытой трещиноватостью, фильтрацией флюида в

высокопроницаемых породах. Все изображения получены с использованием алгоритмов эмиссионной сейсмической томографии.

Результаты и их обсуждение

При сейсмологических наблюдениях на месторождениях углеводородов на записях часто присутствуют интенсивные техногенные помехи, связанные с процессом разработки месторождения. Аддитивные случайные диффузные помехи подавляются легко, но так как источники техногенных помех связаны с какими-то конкретными объектами, то техногенные помехи являются пространственно когерентными. Более того, не всегда источники расположены на поверхности, например, в случае «шумящей» скважины. Такие помехи при использовании эмиссионной томографии могут создавать экранирующий эффект. То есть на изображениях исследуемого объема среды проявятся яркие источники интенсивной техногенной помехи, а на их фоне слабые глубинные источники останутся незамеченными. При адаптации методов эмиссионной томографии для работ на месторождениях углеводородов были разработаны методы адаптивной и режекторной пространственной фильтрации, которые позволяют эффективно устранять влияние когерентных помех (Chebotareva et al., 2008; Chebotareva, 2010a, Chebotareva, 2010b).

Но что еще более интересно, оказалось, что техногенную помеху можно полезно использовать как зондирующий сигнал. Она создает дополнительную сейсмическую «подсветку» геосреды и позволяет выявлять неоднородности с сильными рассеивающими, отражающими свойствами или подземные резонаторы. На рис. 1 приведены два таких примера – изображение тектонического разлома и природной трещины (боковая граница неустойчивого блока породы). Изображение разлома (Рис. 1а,б) имеет сложную пространственную структуру. Известно, что внутренняя часть разломной зоны характеризуется высокой степенью трещиноватости (первые десятки – сотни метров). К центру разлома плотность трещин быстро

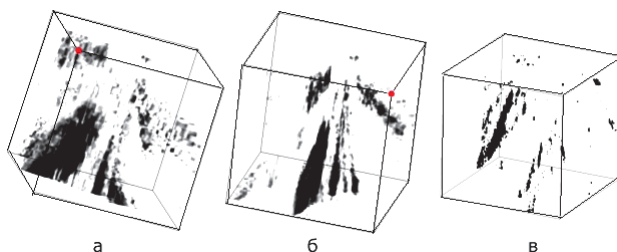


Рис. 1. Использование техногенной помехи для «подсветки» тектонических нарушений, а, б – изображения тектонического разлома с поворотом изометрической проекции, в – изображение природной трещины. Размер ребра исследуемых объемов равен 6 км (а, б) и 3 км (в).

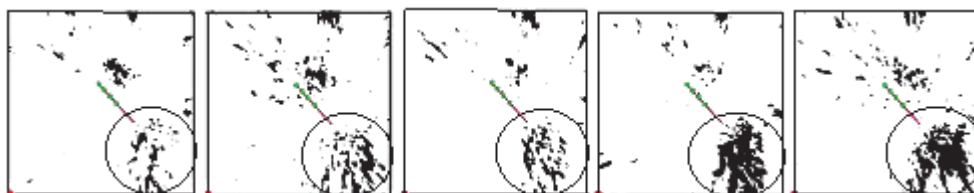


Рис. 2. Развитие процесса истечения жидкости из скважины в высокопроницаемой части пород. Горизонтальные срезы трехмерных изображений на глубине горизонтального ствола скважины. Вектор времени слева на право

возрастает, центральная зона (сантиметры-метры) заполнена раздробленным, фрагментированным материалом. Скорость сейсмических волн вмещающих пород на десятки процентов превышает скорости внутри разлома. То есть разлом является низкоскоростным волноводом. Если источник техногенных помех расположен достаточно близко к разлому, низкоскоростная зона захватывает энергию техногенной помехи. Границы природного волновода не плоские и не абсолютно жесткие, поэтому значительная часть сейсмической энергии просачивается через стенки волновода и он становится видимым для эмиссионной томографии. Вид изображения разломной зоны говорит о том, что значительная часть энергии техногенного воздействия при разработке месторождений закачивается на глубокие горизонты, более 6 км.

На рис. 1в, приведено изображение природной трещины, внутренность которой, как можно ожидать, также заполнена высокофрагментированной породой. Она проявилась на времени перфорационного взрыва. Однако основная энергия перфорационного взрыва лежит в более высоком диапазоне частот, чем излучение трещины. То есть в данном случае наблюдается либо триггерный эффект, либо нелинейная перекачка энергии перфорационного взрыва на более низкие частоты.

На рис. 2 показаны горизонтальные срезы трехмерных изображений на глубине горизонтального ствола скважины. На них изображено развитие процесса истечения жидкости из скважины. Жидкость распространяется в направлении повышенной проницаемости пород. Эмиссионное излучение связано с флуктуациями давления и микроразрушением пород при росте порового давления за фронтом фильтрации.

Как отмечалось выше, сейсмический эмиссионный отклик горных пород стимулируется внешним воздействием. Одним из видов таких техногенных воздействий является гидравлический разрыв пласта. При проведении гидроразрыва, используя микросейсмический мониторинг, в радиусе первых сотен метров обычно изучают характеристики разрушения, дизайн разрыва, абсолютную проницаемость призабойной зоны скважины и пласта (Maxwell, 2010; Economides et al., 2002; Rothert, Shapiro, 2007; Shapiro et al., 2002; Александров др., 2015). Так как эмиссионная томография позволяет исследовать более тонкую структуру поля напряжений, то при эмиссионном сейсмотомографическом мониторинге появляется возможность наблюдать активизацию областей открытой трещиноватости и тектонически неустойчивых блоков в гораздо большем объеме среды. Экспериментальные результаты показывают, что при таком локальном техногенном воздействии распределение активных эмиссионных кластеров существенно изменяется в радиусе нескольких километров от зоны перфорации и различным образом

в разных частотных диапазонах (Чеботарева, Володин, 2012; Chebotareva, 2017; Володин, Чеботарева, 2014).

Изображения среды рассчитывались в различных частотных диапазонах в пределах 10-100 Гц. Было обнаружено, что микроземлетрясения, амплитуды вступлений которых четко выделяются на единичных записях, проявляются в самом нижнем частотном диапазоне. Очаги микроземлетрясений с самого начала воздействия на пласт локализируются по всему исследуемому объему, представляющему собой куб с ребром 3 км (Чеботарева, Володин, 2012). Их нельзя однозначно связать с релаксационной диффузией возмущений порового давления. Более удачным объяснением является триггерный эффект, инициированный изменением напряженно-деформированного состояния горного массива.

Зоны трещиноватости пород проявляются на эмиссионных изображениях в среднем диапазоне частот. Частично они видны до проведения гидроразрыва (Рис. 3а). Однако на времени увеличения давления в среде при закачке жидкости размер излучающего кластера резко возрастает (Рис. 3б), выявляя скрытые, не активные в фоновом состоянии части зоны трещиноватости. После окончания работ, при релаксации напряжений в геосреде, распределение эмиссионных кластеров возвращается к прежнему виду (Рис. 3в).

Поведение эмиссионных кластеров в верхнем диапазоне частот имеет свои отличительные особенности. В фоновом состоянии до и после гидроразрыва распределение эмиссионных источников в среднем и верхнем диапазонах частот похоже. Однако внешнее воздействие разрушает структуру высокочастотного эмиссионного кластера. Распределение интенсивности изображения становится равномерным (Чеботарева, Володин, 2012). Такое возможно, если среда в этом диапазоне частот не излучает или излучает равномерно по всему объему. С ростом давления эмиссионное «свечение» локализуется и стягивается в полосы деформаций, высвечивая положение неустойчивого блока, у основания которого происходит самое сильное микроземлетрясение (Володин, Чеботарева, 2014). Его очаг удален на расстояние более

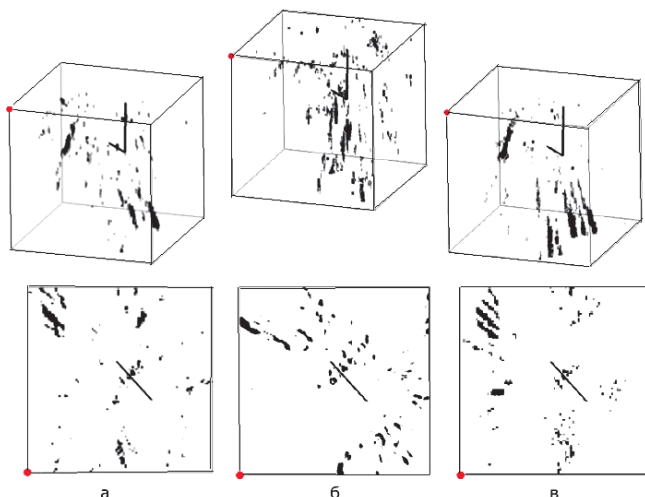


Рис. 3. Распределение эмиссионной активности в зонах структурных неоднородностей (пористость, открытая трещиноватость) а – до, б – во время (интервал роста давления) и в – после работ по гидравлическому разрыву пласта. Размер ребра исследуемого объема равен 3 км.

2 км от зоны перфорации. После сброса давления распределение интенсивности в изображении снова становится равномерным. К первоначальному фоновому виду оно возвращается после релаксации напряжений в массиве пород.

На рис. 4 показано эмиссионное изображение области разрушения пласта на времени между гидроразрывами при многоэтапном гидроразрыве. Эмиссионный сигнал обеспечивается за счет энергии релаксации возмущенного напряженно-деформированного состояния пласта. На горизонтальной проекции хорошо видна несимметричная относительно скважины геометрия гидравлического разрушения. Так как распределение эмиссионных источников является существенно не плоским, то в данном случае наблюдается зона объемного разрушения пласта.

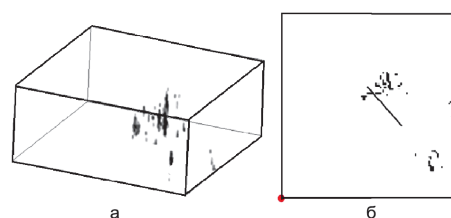


Рис. 4. Зона гидравлического разрушения на времени между гидроразрывами при многоэтапном гидроразрыве пласта. Размер горизонтального ребра равен 3 км, а – изометрическая проекция, б – горизонтальная проекция на глубине горизонтальной скважины.

Заключение

Результаты эмиссионного сейсмотомографического мониторинга на разрабатываемых месторождениях углеводородов показывают, что зоны трещиноватости, тектонической и флюидной активности можно обнаруживать и локализовать с использованием фоновых записей сейсмического шума. Однако более богатую информацию с доразведкой запасов в радиусе нескольких километров можно получать при различных видах внешнего воздействия, таких как гидроразрыв пласта, сильные техногенные помехи, проходящие сейсмические волны от удаленных землетрясений и взрывов. Дополнительную информацию можно извлекать и при переобработке сейсморазведочных записей, при условии проведения работ с использованием современных высокочувствительных сейсмических модулей. Эмиссионная томография и сейсморазведка являются взаимодополняющими методами. Сейсморазведка нацелена на выделение горизонтально протяженных контрастных скоростных границ. Эмиссионная томография нацелена на выделение локальных неоднородностей, которые могут не создавать контрастных отражений. Она работает на других физических принципах и использует эмиссионные сейсмические эффекты, скрытые для методов традиционной сейсморазведки.

Задача изучения особенностей отклика горных пород на природные и техногенные воздействия является фундаментальной научной проблемой. Для разработки эмиссионных сейсмотомографических технологий, которые были бы методически доступны для сервисных компаний, необходимы дополнительные экспериментальные и теоретические исследования. Для надежной интерпретации результатов нужна экспериментальная статистика параметров эмиссионных образцов с точной

привязкой к геологическим объектам. Также необходимо дальнейшее развитие теории генерации сейсмической эмиссии и распространения сейсмических сигналов в структурно-неоднородных средах. Несмотря на то, что с момента регистрации открытия эффекта сейсмической эмиссии прошло 35 лет, полной ясности в механизмах сейсмической эмиссии нет до сих пор.

Часто в работах, связанных с исследованием сейсмической эмиссии, ее появление связывают с большим числом микроразрушений, в том числе на стадии релаксационной диффузии возмущений порового давления. Традиционный мониторинг гидроразрыва проводится с использованием скважинных наблюдений для регистрации микроземлетрясений в диапазоне частот – сотни и первые тысячи герц. Наличие непрерывной эмиссионной составляющей интерпретируют как наложение очень большого числа последовательных импульсных сигналов от множественных образованных сдвиговых трещин. Однако приведенные выше результаты показывают, что эмиссионные эффекты, позволяющие визуализировать связанные с гидроразрывом пласта геодинамические процессы, наблюдаются на существенно более низких частотах – десятки герц. Используя решение задачи для круговой трещины, развитие которой внезапно останавливается (Madariaga et al., 1976; Аки, Ричардсон, 1983), получаем оценку характерного радиуса образованных множественных трещин: $r=0.32*V/f=20$ м, где $V=3$ км/с – скорость сейсмических волн, $f=50$ Гц – частота эмиссионного излучения. Такая оценка не соответствует реальности. Размеры предполагаемых «множественных трещин» слишком велики, если учесть, что обычные размеры гидроразрыва составляют всего первые сотни метров.

Более удачный подход к описанию механизмов эмиссионного излучения на частотах от единиц до первых сотен герц базируется на учете нелинейных свойств структурно неоднородных сред. К данному моменту существует несколько механизмов, разработанных с учетом нелинейности и блоковой дискретности геосреды (Бовенко, 1987; Крылов и др., 1991; Динариев, Николаевский, 1997; Динариев, Николаевский, 1993; Николаевский, 1996; Гарагаш, 2002; Сибиряков, Бобров, 2008). Они описывают генерацию и передачу вверх и вниз по спектру в виде гармоник и субгармоник энергии эмиссионного излучения.

Недавно был предложен новый механизм генерации сейсмической эмиссии на частотах огибающей микроколебаний элементов структурно-неоднородной геосреды (Володин, Чеботарева, 2014). Уравнения движения получены для модели среды в виде одномерных цепочек с герцевской нелинейностью. В современной геофизике широко используются подобные модели гранулированных сред не только для описания рыхлых грунтов, но и для условно монолитных зернистых и кристаллических горных пород. Экспериментально установлено, что в гранулированных средах при пригрузке и при вибровоздействии распределение напряжений по объему сильно неоднородно. Использование фотоупругих материалов позволяет визуально наблюдать формирование сети силовых цепочек, которые несут всю нагрузку на среду. В работе

(Володин, Чеботарева, 2014) показано, что при рассмотрении многомасштабных движений, уравнение движения цепочек для макромасштаба имеет вид нелинейного уравнения Шредингера. Известно, что при выполнении определенного условия на параметры нелинейности и дисперсии возникает модуляционная неустойчивость решения этого уравнения, что выражается в возникновении спонтанной амплитудной модуляции высокочастотной несущей. При распространении модулированной волны в нелинейной среде происходит ее детектирование (Зарембо, Красильников, 1966), в результате которого остается только низкочастотная составляющая, которая регистрируется на больших расстояниях от источника. Соотношение основной и модуляционной частоты зависит от структурных параметров среды и обычно составляет несколько порядков. Вследствие этого на сейсмических частотах в десятки герц можно изучать удаленные области структурно неоднородного включения с частотой микроколебаний в единицы – сотни кГц. Результаты физического моделирования на кернах нефтяных месторождений показывают, что при нагружении образцов керна и при вибровоздействии действительно наблюдается генерация динамически связанного излучения в диапазонах 10-100 Гц и 5-20 кГц, в то время как динамика промежуточного диапазона частот существенно отличается (Chebotareva et al., 2017).

Выводы

1. Метод эмиссионной сейсмической томографии позволяет выявлять тектонические нарушения, открытую трещиноватость и пористость, изучать геофизические процессы в зонах структурной и флюидальной неоднородности природного массива с использованием многоканальных записей естественного сейсмического фона Земли, зарегистрированного на поверхности.
2. Техногенные и природные внешние воздействия на геосреду активизируют области структурной неоднородности, латентные в фоновом состоянии. Это позволяет на стадии разработки проводить доразведку месторождения, выявлять перспективные пласты и пропущенные залежи. В частности, при проведении гидроразрыва пласта возможна доразведка месторождения в радиусе нескольких километров.
3. Для надежной интерпретации результатов и развития эффективных сервисных технологий необходимы экспериментальные исследования сейсмических эффектов, наблюдаемых на месторождениях углеводородов, с точной геологической привязкой эмиссионных объектов.
4. Необходимо дальнейшее развитие теории генерации сейсмической эмиссии и распространения сейсмических сигналов в структурно-неоднородных средах.

Литература

- Аки К, Ричардсон П. (1983). Количественная сейсмология. Теория и методы. Москва: Мир, т. 2, 831 с.
- Александров С.И., Мишин В.А., Буров Д.И. (2015). Проблемы скважинного и наземного микросейсмического мониторинга гидроразрыва пласта. *Экспозиция Нефть и Газ*, 6(45), с. 58-63.
- Астраханцев Ю.Г., Губерман Д.М., Дьяконов В.П., Певзнер С.Л., Троянов А.К., Яковлев Ю.Н. (2007). Геоакустические шумы в Кольской сверхглубокой скважине. *Вестник МГТУ*, 10(2), с. 231-235.

- Атлас временных вариаций природных процессов. (1994). Рук. Н.П. Лаверов. Отв. ред. А.В. Николаев, А.Г. Гамбурцев. Москва: Научный мир, т. 1, 176 с.
- Бовенко В.Н. (1987). Автоколебательная модель акустоэмиссионных и сейсмических явлений. *Докл. АН СССР*, 297(5), с. 1103-1106.
- Володин И.А., Чеботарева И.Я. (2014). Сейсмическая эмиссия в зонах техногенных воздействий. *Акустический журнал*, 60(5), с. 505-517. DOI: 10.7868/S0320791914050141
- Гальперин Е.И., Винник Л.П., Петерсен Н.В. (1987). О модуляции высокочастотного сейсмического шума приливными деформациями литосферы. *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*, 12, с. 102-109.
- Гамбурцев Г.А. (1960). Избранные труды. Москва: АН СССР, с. 424-425.
- Галеев Д.Н., Ерохин Г.Н., Родин С.В., Седайкин Р.Д., Смирнов И.И. (2014). Новые возможности применения пассивного микросейсмического мониторинга для выявления структурно-тектонических особенностей участков нефтегазовых месторождений. *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта*, 4, с. 113-120.
- Гарагаш И.А. (2002). Модель динамики фрагментированных сред с подвижными блоками. *Физическая мезомеханика*, 5(5), с. 71-77.
- Голицын Б.Б. (1960). Избранные труды. Москва: АН СССР, т. 2, с. 411-413.
- Гордеев Е.И., Рыкунов Л.Н. (1976). Спектры Р-волн от удаленных землетрясений в области частот 1-10 Гц. *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*, 7, с. 90-92.
- Дарвин Д.Г. (1965). Приливы и родственные им явления в солнечной системе. Москва: Наука, 106 с.
- Динариев О.Ю., Николаевский В.Н. (1993). Ползучесть горных пород как источник сейсмического шума. *Доклады РАН*, 331(6), с. 739-741.
- Динариев О.Ю., Николаевский В.Н. (1997). Кратное увеличение периода при распространении волн в упругих телах с диссипативной микроструктурой. *Изв. РАН, МТТ*, 6, с. 78-85.
- Дьяконов Б.П., Троянов А.К., Назаров А.Н., Фадеев В.А. (1989). Сейсмоакустические шумы на глубоких горизонтах. *Доклады АН СССР*, 309(2), с. 314-318.
- Дьяконов Б.П., Троянов А.К., Кусонский О.А., Назаров А.Н., Фадеев В.А. (1991). Геологическая информативность скважных исследований высокочастотных сейсмоакустических шумов. *Вулканология и сейсмология*, 1, с. 112-116.
- Дьяконов Б.П., Мартышко П.С., Троянов А.К., Астраханцев Ю.Г., Начапкин Н.И. (2010). Выделение периодичностей низкочастотных деформационных процессов в вариациях электромагнитного излучения в Уральской сверхглубокой скважине. *Доклады РАН*, 430(1), с. 105-107.
- Жадин В.В. (1971). О частотном составе записей продольных волн от удаленных землетрясений. *Изв. АН СССР, Сер. Физика Земли*, 5, с. 99-101.
- Зарембо Л. К., Красильников В.А. (1966). Введение в нелинейную акустику. Москва: Наука, 519 с.
- Крылов А.Л., Николаевский В.Н., Эль Г.А. (1991). Математическая модель нелинейной генерации ультразвука сейсмическими волнами. *Доклады АН СССР*, 318(6), с. 1340-1344.
- Кузнецов О.Л., Радван А.А., Чиркин И.А., Ризанов Е.Г., Колигаев С.О. (2016). Комплексирование сейсмических волн разного класса для поиска и разведки месторождений углеводородного сырья (Новая методология сейсморазведки). *Технологии сейсморазведки*, 3, с. 38-47. DOI: 10.18303/1813-4254-2016-3-38-47.
- Лукк А.А., Дещеревский А.В., Сидорин А.Я., Сидорин И.Я. (1996). Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. Москва: ОИФЗ РАН, 210 с.
- Максимов Л.А., Ведерников Г.В., Яшков Г.Н. (2015). Геодинамический шум залежей углеводородов и пассивно-активная сейсморазведка МОГТ. *Экспозиция Нефть и Газ*, 6(45), с. 55-57
- Науменко Б.Н. (1979). О явлении частичной ликвидации тектонических напряжений штормовыми микросейсмами. *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*, 8, с. 72-75.
- Николаев А.В., Троицкий П.А., Чеботарева И.Я. (1983). Способ сейсмической разведки: А.с. 1000962 СССР. № 3213796, Заявл. 08.12.80; Опубл. 28.02.83. *Открытия, изобретения*, 8, 4 с.
- Николаевский В.Н. (1996). Геомеханика и флюидодинамика. Москва: Недра, 448 с.
- Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. (1983). Явление модуляции высокочастотных сейсмических шумов Земли. *Диплом на открытие №282 Госкомизобретений СССР*, М. с. 1.
- Сибиряков Б.П., Бобров Б.А. (2008). О природе возникновения акустической эмиссии при статическом нагружении песков. *Физическая мезомеханика*, 11(1), с. 80-84.
- Хаврошкин О.Б. (1999). Некоторые проблемы нелинейной сейсмологии. Москва: ОИФЗ РАН, 286 с.
- Чеботарева И.Я. (2012). Структура и динамика геосреды в шумовых сейсмических полях. Методы и экспериментальные результаты. *Акустика неоднородных сред. Ежегодник Российского акустического общества*. Москва: ГЕОС, 12, с. 147-156.
- Чеботарева И.Я., Володин И.А. (2012). Образы процесса гидроразрыва пласта в сейсмическом шуме. *Доклады РАН*, 444(2), с. 202-207.
- Чеботарева И.Я. (2017). Эмиссионная томография – базовый инструмент для технологий изучения месторождений углеводородов. *Актуальные проблемы нефти и газа*. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2017-17.art8
- Chebotareva I. Ya., Kushnir A. F., Rozhkov M. V. (2008). Elimination of high-amplitude noise during passive monitoring of hydrocarbon deposits by the emission tomography method. *Izvestiya, Phys. Solid Earth*, 44, pp. 1002-1007.
- Chebotareva I. Ya. (2010a). New Algorithms of Emission tomography for passive seismic monitoring of a producing hydrocarbon deposit. Part I. Algorithms of Processing and Numerical Simulation. *Izvestiya, Phys. Solid Earth*, 46(3), pp. 187-198.
- Chebotareva I. Ya. (2010b). New Algorithms of Emission tomography for passive seismic monitoring of a producing hydrocarbon deposit. Part II. Results of Real Data Processing. *Izvestiya, Phys. Solid Earth*, 46(3), pp. 199-215.
- Chebotareva I. Ya. (2011). Methods for passive study of the geological environment using seismic noise. *Acoust. Phys.*, 57(6), pp. 857-865.
- Chebotareva I. Ya., Volodin I. A., Dryagin V. V. (2017). Acoustic Effects in the Deformation of Structurally Inhomogeneous Media. *Acoustical Physics*, 63(1), pp. 84-93.
- Chebotareva, I. Ya. (2018). Ray Tracing Methods in Seismic Emission Tomography. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 54(2), pp. 201-213. DOI: 10.1134/S1069351318020040
- Economides M., Oligney R., Valko P. (2002). Unified fracture design. Bridging the gap between theory and practice. Alvin. Texas: Orsa Press. 200 p.
- Diakonov B. P., Karryev B. S., Khavrishkin O. B., Nikolaev A. V., Rykunov L. N., Seroglazove R. R., Trojanov A. K., Tsyplakov V. V. (1990). Manifestation of earth deformation processes by high-frequency seismic noise characteristics. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 63, pp. 151-162.
- Leet L. D., Leet F. L. (1962). Cause of microseisms – a theory. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 72(8), pp. 1021-1022.
- Madariaga R. (1976). Dynamics of an expanding circular fault. *Bulletin of Seismological Society of America*, 66(3), pp. 669-666.
- Maxwell S. (2010). Microseismic: growth born from success. *The Leading Edge*, 29, pp. 338-343.
- Nanney C. A. (1958). Possible correlations between earthquakes and microseisms. *Nature*, 181, pp. 802-803.
- Rothert E., Shapiro S. A. (2007). Statistics of fracture strength and fluid-induced microseismicity. *Journal of Geophysical Research*, 112 (B04309), pp. 1-16. DOI: 10.1029/2005JB003959.
- Shapiro S. A., Rothert E., Rath V., and Rindschwentner J. (2002). Characterization of fluid transport properties of reservoirs using induced microseismicity. *Geophysics*, 6, pp. 7212-220.
- Tchebotareva I. Ya., Nikolaev A. V., Sato H. (2000). Seismic Emission Activity of Earth's Crust in Northern Kanto, Japan. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 120(3), pp. 167-182.

Сведения об авторе

Ирина Яковлевна Чеботарева – главный научный сотрудник

Институт проблем нефти и газа РАН
Россия, 117971, Москва, ул. Губкина, 3
E-mail: irinache@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 14.06.2018;

Принята к публикации 19.07.2018;

Опубликована 30.08.2018

Emission seismic tomography – the tool to study fracturing and fluidodynamics of the Earth crust

I.Ya. Chebotareva

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

Abstract. The article presents the results of seismotomographic monitoring of emission sources associated with fractured zone, tectonic faults and fluid filtration in the high permeable rocks. It is shown that the Earth's natural seismic noise recorded by surface array can be used to study the geodynamic processes caused by the presence of such inhomogeneities. The source of useful information is the extremely weak spatially coherent component of the seismic wave field – the seismic emission generated by background deformation in the energy-saturated volumes of rocks. Additional external technological and natural impact activates latent volumes of geophysical heterogeneity, which reveals new emission targets hidden in the background state. It makes to conduct additional exploration of the field within a radius of several kilometers during hydraulic fracturing.

The article also touches on the history of discovery of the seismic emission phenomenon and the mechanisms of generation of a low-frequency branch of emission as a result of amplitude instability of envelopes of high-frequency acoustic oscillations excited as a result of energetic impact on the medium. Low-frequency emission (1-100 Hz) provides the remote study of high-frequency (1-100 kHz) emission oscillations in the energy-saturated volumes located at a great distance from the seismic array.

Keywords: emission seismic tomography, seismic emission, structurally inhomogeneous media, oil and gas field

Recommended citation: Chebotareva I.Ya. (2018). Emission seismic tomography – the tool to study fracturing and fluidodynamics of the Earth crust. *Georesursy = Georesources*, 20(3), Part 2, pp. 238-245. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2018.3.238-245>

References

- Aki K., Richardson P. (1983). Quantitative seismology. Theory and methods. Moscow: Mir, v. 2, 831 p. (In Russ.)
- Aleksandrov S. I., Mishin V. A., Burov D. I. 2015. Problems of well and ground microseismic monitoring of hydraulic fracturing. *Expozitsiya Neft' i Gaz = Exposition Oil & Gas*, 6(45), pp. 58-63. (In Russ.)
- Astrahancev Yu.G., Guberian D.M., D'yakonov V.P., Pevzner S.L., Troyanov A.K., Yakovlev Yu.N. (2007). Geoacoustic noise in the Kola superdeep well. *Vestnik MGTU*, 10(2), pp. 231-235. (In Russ.)
- Atlas of temporal variations of natural processes. (1994). Project Man. N.P. Laverov. Ed. A.V. Nikolaev, A.G. Gamburcev. Moscow: Nauchnyy mir, v. 1, 176 p. (In Russ.)
- Bovenko V. N. (1987). Self-oscillatory model of acoustoemission and seismic phenomena. *Dokl. AN SSSR*, 297(5), pp. 1103-1106. (In Russ.)
- Chebotareva I.Ya., Kushnir A.F., Rozhkov M.V. (2008). Elimination of high-amplitude noise during passive monitoring of hydrocarbon deposits by the emission tomography method. *Izvestiya, Phys. Solid Earth*, 44, pp. 1002-1007.
- Chebotareva I.Ya. (2010a). New Algorithms of Emission tomography for passive seismic monitoring of a producing hydrocarbon deposit. Part I. Algorithms of Processing and Numerical Simulation. *Izvestiya, Phys. Solid Earth*, 46(3), pp. 187-198.
- Chebotareva I.Ya. (2010b). New Algorithms of Emission tomography for passive seismic monitoring of a producing hydrocarbon deposit. Part II. Results of Real Data Processing. *Izvestiya, Phys. Solid Earth*, 46(3), pp. 199-215.
- Chebotareva I.Ya. (2011). Methods for passive study of the geological environment using seismic noise. *Acoust. Phys.*, 57(6), pp. 857-865.
- Chebotareva I.Ya. (2012). Structure and dynamics of geomedias in noise seismic fields. Methods and experimental results. *Akustika neodnorodnykh sred. Ezhegodnik Rossijskogo akusticheskogo obshchestva*. Moscow: GEOS, 12, pp. 147-156. (In Russ.)
- Chebotareva I.Ya., Volodin I.A. (2012). Images of Hydraulic Fracture in Seismic Noise. *Doklady Earth Sciences*, 444(1), pp. 621-625.
- Chebotareva I.Ya. (2017). Emission tomography – basic tool for technologies for studies of hydrocarbon deposits. *Akualnii problemi nefti i gasa = Actual problems of oil and gas*. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2017-17.art8 (in Russ.)
- Chebotareva I.Ya., Volodin I.A., Dryagin V.V. (2017). Acoustic Effects in the Deformation of Structurally Inhomogeneous Media. *Acoustical Physics*, 63(1), pp. 84-93.
- Chebotareva, I.Ya. (2018). Ray Tracing Methods in Seismic Emission Tomography. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 54(2), pp. 201-213. DOI: 10.1134/S1069351318020040
- Darvin D.G. (1965). Tides and related phenomena in the solar system. Moscow: Nauka, 106 p. (In Russ.)
- Diakonov B.P., Troyanov A.K., Nazarov A.N., Fadeev V.A. (1989). Seismoacoustic noise on deep horizons. *Doklady AN SSSR*, 309(2), pp. 314-318. (In Russ.)
- Diakonov B.P., Karryev B.S., Khavrishkin O.B., Nikolaev A.V., Rykunov L.N., Seroglazov R.R., Trojanov A.K., Tsyplakov V.V. (1990). Manifestation of earth deformation processes by high-frequency seismic noise characteristics. *Phys. Earth Planet. Inter*, 63, pp. 151-162.
- Diakonov B.P., Troyanov A.K., Kusonskiy O.A., Nazarov A.N., Fadeev V.A. (1991). Geological information of downhole surveys of high-frequency seismoacoustic noise. *Vulkanologiya i seysmologiya = Volcanology and Seismology*, 1, pp. 112-116. (In Russ.)
- Diakonov B.P., Martysenko P.S., Troyanov A.K., Astrahancev YU.G., Nachapkin N.I. (2010). Isolation of periodicities of low-frequency deformation processes in variations of electromagnetic radiation in the Ural superdeep well. *Doklady RAN*, 430(1), pp. 105-107. (In Russ.)
- Dinariyev O.Yu., Nikolaevskiy V.N. (1993). Creep of rocks as a source of seismic noise. *Doklady RAN*, 331(6), pp. 739-741. (In Russ.)
- Dinariyev O.Yu., Nikolaevskiy V.N. (1997). Multiple period increase in the propagation of waves in elastic bodies with a dissipative microstructure. *Izv. RAN, MTT*, 6, pp. 78-85. (In Russ.)
- Economides M., Oligney R., Valko P. (2002). Unified fracture design. Bridging the gap between theory and practice. Alvin. Texas: Orsa Press. 200 p.
- Galperin E.I., Vinnik L.P., Petersen N.V. (1987). On modulation of high-frequency seismic noise by tidal deformations of the lithosphere. *Izv. AN SSSR. Ser. Fizika Zemli*, 12, pp. 102-109.
- Gamburcev G.A. (1960). *Izbrannyye trudy*. Moscow: AN SSSR, pp. 424-425. (In Russ.)
- Gapeev D.N., Erohin G.N., Rodin S.V., Sedajkin R.D., Smirnov I.I. (2014). New possibilities of applying passive microseismic monitoring for revealing structural-tectonic features of oil and gas fields. *Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta*, 4, pp. 113-120. (In Russ.)
- Garagash I.A. (2002). Model of dynamics of fragmented media with moving blocks. *Fizicheskaya mekhanika*, 5(5), pp. 71-77. (In Russ.)
- Golicyn B.B. (1960). *Izbrannyye trudy*. Moscow: AN SSSR, v. 2, pp. 411-413. (In Russ.)
- Gordeev E.I., Rykunov L.N. (1976). Spectra of P-waves from remote earthquakes in the frequency range 1-10 Hz. *Izv. AN SSSR. Ser. Fizika Zemli*, 7, pp. 90-92. (In Russ.)
- Havroskin O.B. (1999). Some problems of nonlinear seismology. Moscow: OIFZ RAN, 286 p. (In Russ.)
- Kouznetsov, A.A. Radwan, I.A. Chirkin, E.G. Rizanov, S.O. Koligaev. (2016). Combining seismic waves of different classes in exploration of hydrocarbon fields (new seismic exploration methodology). *Tekhnologii*

seysmorazvedki. (3), pp. 38-47. DOI: 10.18303/1813-4254-2016-3-38-47. (In Russ.)

Krylov A.L., Nikolaevskiy V.N., EHI' G.A. (1991). Mathematical model of nonlinear generation of ultrasound by seismic waves. *Doklady AN SSSR*, 318(6), pp. 1340-1344. (In Russ.)

Leet L.D., Leet F.L. (1962). Cause of microseisms – a theory. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 72(8), pp. 1021-1022.

Lukk A.A., Deshcherevskij A.V., Sidorin A.YA., Sidorin I.YA. (1996). Variations of geophysical fields as a manifestation of deterministic chaos in a fractal environment. Moscow: OIFZ RAN, 210 p.

Madariaga R. (1976). Dynamics of an expanding circular fault. *Bulletin of Seismological Society of America*, 66(3), pp. 669-666.

Maksimov L.A., Vedernikov G.V., Yashkov G.N. (2015). Geodynamic noise of hydrocarbon pools and passive and active seismic CDPМ. *Expozitsiya Neft' i Gaz = Exposition Oil & Gas*, 6(45), pp. 55-57. (In Russ.)

Maxwell S. (2010). Microseismic: growth born from success. *The Leading Edge*, 29, pp. 338-343.

Nanney C.A. (1958). Possible correlations between earthquakes and microseisms. *Nature*, 181, pp. 802-803.

Naumenko B.N. (1979). On the phenomenon of partial elimination of tectonic stresses by storm microseisms. *Izv. AN SSSR. Ser. Fizika Zemli*, 8, pp. 72-75. (In Russ.)

Nikolaev A.V., Troickiy P.A., Chebotareva I.YA. (1983). Method of seismic prospecting: A. C. 1000962 SSSR. No. 3213796, declared 08.12.80; Publ. 28.02.83. *Otkrytiya, izobreteniya*, 8, 4 p. (In Russ.)

Nikolaevskiy V.N. (1996). Geomechanics and fluid dynamics. Moscow: Nedra, 448 p. (In Russ.)

Rothert E., Shapiro S. A. (2007). Statistics of fracture strength and fluid-induced microseismicity. *Journal of Geophysical Research*, 112 (B04309), pp.1-16. DOI: 10.1029/2005JB003959

Rykunov L.N., Havroshkin O.B., Cyplakov V.V. (1983). The phenomenon

of modulation of high-frequency seismic noise of the Earth. Certificate No. 282, Moscow (In Russ.)

Shapiro S.A., Rothert E., Rath V., and Rindschwentner J. (2002). Characterization of fluid transport properties of reservoirs using induced microseismicity. *Geophysics*, 6, pp. 7212-220.

Sibiriyakov B.P., Bobrov B.A. (2008). Origin of acoustic emission under static loading of sands. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 11(1), pp. 80-84. (In Russ.)

Tchebotareva I. Ya., Nikolaev A.V., Sato H. (2000). Seismic Emission Activity of Earth's Crust in Northern Kanto, Japan. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 120(3), pp.167-182.

Volodin I. A., Chebotareva I. Ya. (2014). Seismic Emission in Technological Impact Zones. *Acoustical Physics*, 60(5), pp. 543-554. DOI: 10.1134/S1063771014050145

Zarembo L.K., Krasilnikov V.A. (1966). Introduction to nonlinear acoustics. Moscow: Nauka, 519 p. (In Russ.)

Zhadin V.V. (1971). On the frequency composition of longitudinal wave records from remote earthquakes. *Izv. AN SSSR, Ser. Fizika zemli*, 5, pp. 99-101. (In Russ.)

About the Author

Irina Ya. Chebotareva – Chief Researcher
Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy
of Sciences
Gubkin st., 3, Moscow, 117971, Russian Federation
E-mail: irinache@inbox.ru

Manuscript received 14 June 2018;

Accepted 19 July 2018; Published 30 August 2018