

ЭМИССИОННАЯ ТОМОГРАФИЯ – БАЗОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗУЧЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

И.Я. Чеботарева
ИПНГ РАН, e-mail: irinache@inbox.ru

Метод сейсмической эмиссионной томографии был предложен в рамках экспериментальных сейсмологических исследований, проводимых под руководством А.В. Николаева в начале 80-х годов прошлого века [1]. Метод был использован отечественными и зарубежными сейсмологами для локализации эмиссионных источников в коре Земли в регионах с сейсмической, вулканической и геотермальной активностью [2, 16]. Однако, до сих пор метод мало применяется для работ на месторождениях углеводородов, хоть считается перспективным и есть примеры его успешного использования. Сейсмическая эмиссионная томография используется в деятельности американских сервисных компаний MicroSeismic, Inc. и Global Geophysical Services, Inc. В нашей стране также существует несколько исследовательских групп, занимающихся развитием технологий с использованием эмиссионной томографии для мониторинга гидравлического разрыва пласта и позиционирования распределения интенсивной открытой трещиноватости (работы коллективов под руководством С.И. Александрова, О.Л. Кузнецова, Г.Н. Ерохина и др).

Одним из тормозящих факторов развития метода является недостаточный объем систематических полевых исследований, что связано с труднодоступностью полевого оборудования, удовлетворяющего требованиям метода. Вторым тормозящим фактором является сильное отставание от практических потребностей теоретического описания волновых явлений в структурно неоднородном флюидонасыщенном массиве пород. В частности, недостаточно изучены механизмы генерации сейсмической эмиссии, которая является физической основой сейсмической эмиссионной томографии, а эти знания необходимы для достоверной интерпретации результатов исследований.

Эмиссионная сейсмическая томография позволяет с использованием многоканальных записей сейсмического фона, зарегистрированного на поверхности, локализовать эндогенные сейсмические источники, оценить мощность и спектральный состав их излучения. Метод позволяет работать с экстремально слабыми глубинными источниками, существенно меньшими по мощности, чем микроземлетрясения, а также с источниками непрерывной шумоподобной компоненты без четких вступлений. В

алгоритмах сейсмической эмиссионной томографии отсутствует этап определения времен вступления фаз, поэтому они успешны в обработке сигналов с интерферирующими и нечеткими вступлениями, при экстремально слабых сигналах, полностью маскируемых шумом на единичных записях.

К настоящему времени методы локализации источников в сейсмической томографии достаточно хорошо разработаны. В частности, автором статьи разработаны алгоритмы с реализацией в частотной и временной области и методики их применения, позволяющие анализировать результаты однокомпонентной и трехкомпонентной регистрации волнового поля и работать в широком диапазоне пространственных масштабов [7, 8, 10, 12, 14–16]. Экспериментально подтвержденная максимальная глубина исследования земных недр достигает нижней части литосферы Земли [15]. Разработаны "быстрые" приближенные методы трассировки лучей для горизонтально-слоистых и градиентных скоростных моделей среды, а также для моделей слоистых сред со сложной геометрией границ, что важно для точной привязки эмиссионных источников по сейсморазведочным скоростным моделям [17, 18].

При адаптации метода сейсмической эмиссионной томографии к исследованиям эксплуатируемых месторождений углеводородов автором данной статьи разработаны методы подавления пространственно когерентной помехи природного и техногенного происхождения [19–21, 14, 16]. На результатах обработки полевых данных и с использованием численного моделирования показано [20, 21], что интенсивная когерентная техногенная помеха, с поверхностной или глубинной генерацией, может быть полностью подавлена. В результате на изображениях среды проявляются глубинные эмиссионные объекты, которые техногенная помеха экранировала при использовании ординарных алгоритмов.

При проведении полевых исследований обнаружилось, что техногенную помеху можно не только устранять, но и полезно использовать [21], например, для локализации областей с активной тектоникой. На рис. 1а показано, как в эмиссионных изображениях среды выглядят области тектонической активизации разломов, произошедшие в результате изменений пластовых давлений при отборе нефти. На сейсмических записях сигналы, связанные с небольшими подвижками в сочленении разломов, выглядят как короткие мало-амплитудные фазы без четкого разделения на типы первых вступлений. На рис. 1б показано изображение разломной зоны, полученное на времени существования

сильной техногенной помехи, порожденной шумящей самоизливающейся скважиной, расположенной в непосредственной близости от разлома. «Подсвеченная» внутренность разлома хорошо видна и прослеживается от поверхности до глубины 6 км. Узкие, изогнутые квазипараллельные поверхности проявляют, в основном, широтное простирание. Волноводная зона имеет сложное строение во всех направлениях.

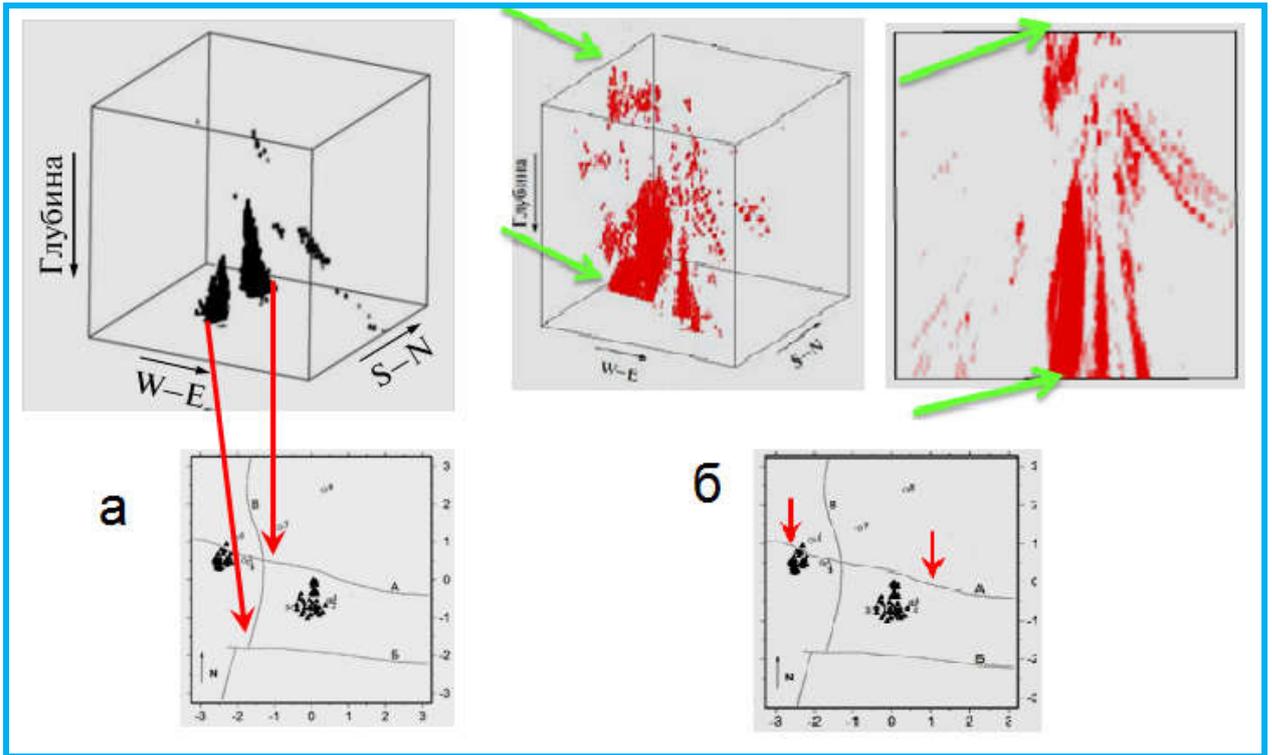


Рис. 1. Полезное использование техногенных и природных помех: а – изображения области тектонических подвижек, инициированных процессом разработки; б – изображение тектонического разлома при подсветке техногенной помехой; слева – изометрическая проекция, справа – вид со стороны западной грани. На рисунке внизу показана схема района исследований с положением тектонических разломов и двух регистрирующих групп сейсмических датчиков. Ребро исследуемого объема составляет 6 км

Из приведенных результатов видно, что эмиссионная томография позволяет выявлять даже безамплитудные разломы и обеспечивать детальное трехмерное оконтуривание разуплотненных зон. Это, конечно, единичный результат, но он раскрывает перспективы создания (на базе данного результата) технологии для определения локализации тектонических разрывов (с точной привязкой в пространстве) и особенностей их структуры. При этом могут быть использованы мобильные

регистрирующие группы бескабельных сейсмических модулей и подсветка техногенным сейсмическим шумом или сигналами от вибраторов.

В статье «Новые методы сейсмической разведки» [22], вышедшей еще в 80-х годах прошлого века, М.А. Садовский и А.В. Николаев отметили, что вибровоздействие и приливные деформации стимулируют сейсмическую эмиссию, а интенсивность эмиссии связана с напряженным состоянием среды, ее трещиноватостью разных масштабов. Характер эмиссии несет информацию об этих качествах среды, что отражается в изменении структуры фоновых сейсмических колебаний вблизи рудных тел и залежей нефти и газа. Чтобы полезно использовать эту информацию необходим переход к новой модели среды – дискретной, изменяемой во времени, энергетически активной. Также необходимо использование соответствующих новых методов обработки сейсмических данных (в цитируемой статье в качестве примера приводится эмиссионная томография). Авторы статьи высказали убеждение, что глубокое изучение физических явлений, связанных с распространением волн в реальных средах, и использование новых экспериментальных подходов позволит усовершенствовать теорию и методику интерпретации традиционных методов сейсмической разведки.

Хотя со времени опубликования работы прошло уже более 35 лет, она выглядит очень актуальна. Пока что наблюдаются весьма не достаточные для практических потребностей продвижения как с разработкой теории распространения волн в реальном структурно неоднородном флюидонасыщенном массиве пород, так и с внедрением в сейсморазведку методов изучения сейсмических эмиссионных эффектов.

В рамках современной модели «геосреды» литосфера (кора и верхняя мантия) рассматривается как открытая неравновесная нелинейная динамическая система, проявляющая изменчивость параметров, с блочной иерархической структурой и энергонасыщенностью [23–27]. Надо отметить, что у такой модели есть некоторые внутренние противоречия, неоднозначности и вопросы без ответов [28], но она наиболее соответствует современному уровню эмпирических знаний. Понятно, что процесс деформирования такой среды невозможно описать в рамках механики сплошной среды. В данное время существует и активно развивается направление физической мезомеханики, которая описывает процессы деформирования и разрушения структурно неоднородных сред. Деформируемое твердое тело рассматривается как многоуровневая

самоорганизующаяся система, уровни которой (микро-, мезо- и макро-) органически взаимосвязаны [28–31].

Согласно представлениям мезомеханики, пластические течения развиваются самосогласованно как эволюция потери сдвиговой устойчивости от микро к макроуровню через ряд промежуточных масштабов – мезоуровней. Элементами мезоуровней являются зерна, конгломераты зерен, деформационные домены, поры и пр. На каждом уровне процессы развиваются по своим закономерностям, но они взаимосвязаны и могут протекать одновременно на разных уровнях. При этом формируются диссипативные субструктуры, вызванные необходимостью многоуровневой самоорганизации иерархически организованной системы мезообъемов в соответствии с заданными граничными условиями.

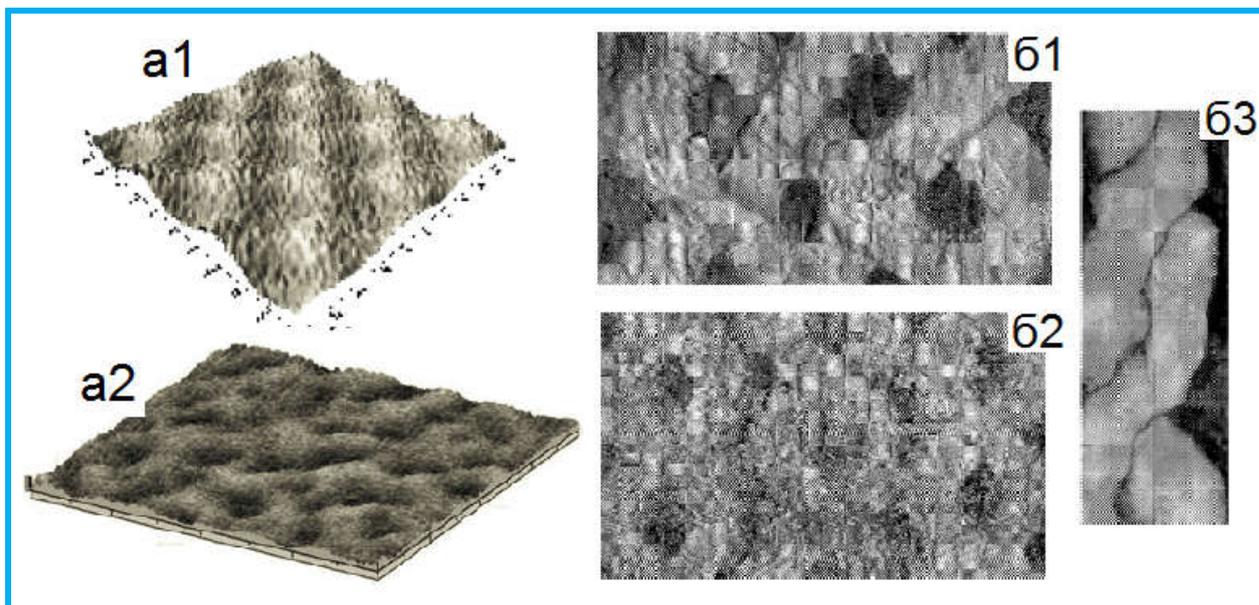


Рис. 2. Примеры диссипативные структуры на интерфейсах разнородных сред в условиях внешних воздействий: a1, a2 – «шахматное распределение» деформаций на границе раздела «модифицированный слой-подложка» при одноосном сжатии (a1 – теоретический расчет, a2 – экспериментальный результат для образца из сплава циркония); б1, б2, б3 – пластическое течения механизмом распространения мезополос на последовательных этапах увеличения деформаций от б1 к б3. Монтаж рисунков из работы [31]

Особая роль уделяется внешним поверхностям и внутренним границам раздела: они рассматриваются не просто как планарные дефекты, а как функциональные подсистемы, с которыми связаны концентраторы напряжений различных масштабов и в

которых развиваются локализованные пластические течения. Последними обуславливается возникновение и распространение в кристаллическую подсистему всех типов деформационных дефектов (дисклинации, полосовые текстуры, кинкбанды, микродвойники, ламели и др.). На мезоуровне становятся возможными перестроения на большие расстояния в произвольных кристаллографических направлениях. Мезодефекты, содержащие как сдвиговую, так и поворотную компоненту деформации, делают возможным перемещение в деформируемом твердом теле объемных структурных элементов различного масштаба (субзерен, зерен, их агрегатов, протяженных фрагментов материала – субблоков).

Теоретические положения мезомеханики получили блестящее экспериментальное подтверждение, в частности, при исследовании механизмов деформации, разрушения и изнашиваемости поверхности и интерфейсов металлических материалов [29–31]. На рис.2 показаны примеры диссипативных структур, возникающих в результате самоорганизации при пластическом течении в наноструктурированных поверхностных слоях металлических поликристаллов.

Геоматериалы в условиях их естественного залегания существенно отличаются от металлов по структурным особенностям и форме нагружения. Геоматериалы часто осложнены большим количеством пор и трещин разного масштаба, содержат флюид, водный или иного состава, который не только изменяет литостатическое давление, но ведет себя как поверхностно активное вещество. Горный массив находится в состоянии всестороннего сжатия, сложного напряженного состояния, что является важной особенностью его деформирования. Однако некоторые положения мезомеханики, видимо, являются универсальными: процесс деформирования и деструкции протекает как процесс самоорганизации блочной среды с формированием диссипативных мезоструктур, в частности, полос локализация деформаций и полос пластичности, с возникновением поворотных мод в движении мезоблоков более жесткого материала [28]. На рис. 3 показаны примеры диссипативных (плюмажных) структур, образованных в природном горном массиве и при физическом моделировании деформирования геоматериала при сложном нагружении. В эксперименте такие структуры образуются при достаточно большом гидростатическом давлении, что соответствует большим глубинами природного массива. При деформировании сначала образуются дилатанционные полосы, которые быстро эволюционируют в поверхности нарушения сплошности. Области деструкции

материала имеют извилистую разрыхленную границу с пустотами, разуплотненными повернутыми зернами, перемычками неповрежденного материала, (рис. 3е, рис. 3f).

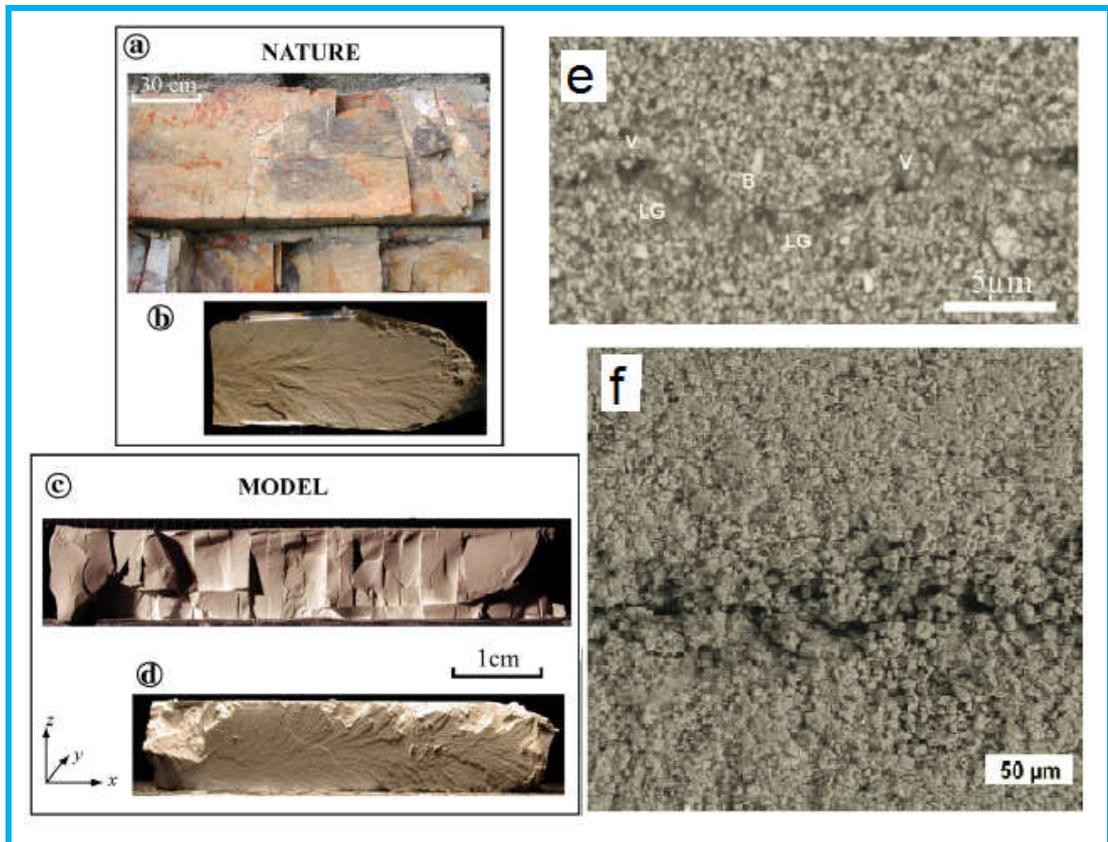


Рис. 3. Примеры природных и «экспериментальных» плюмажных структур, образующихся в геоматериале при достаточно больших литологических давлениях: а, б – эоценовые слои известняка, разделенные мраморными горизонтами (Col de Nice, South France); с, d – результаты физического моделирования в условиях плоской трехмерной деформации; е, f – изображения границ разрыва при моделировании, полученные с использованием электронной микроскопии. Монтаж рисунков из работы [32]

Как отмечает С.В. Гольдин в своей статье [28], в горном массиве, в отличие от образцов, процесс аккомодации имеет более длительный характер и условия для самоорганизации среды более благоприятны. Также он пишет, что «другим отличием от экспериментов является многофакторность процессов, происходящих в зонах деструкции и, как следствие, наличие условий для реализации более разнообразных форм накопления энергии, обусловленной деформацией материала и действующими напряжениями».

Известно, что процесс нагружения образцов различных материалов при лабораторных исследованиях сопровождается акустической эмиссией, которая может

быть представлена как дискретной, импульсной, так и непрерывной шумоподобной компонентой [33]. Многолетние наблюдения на выбросоопасных угольных пластах и в сейсмоактивных районах свидетельствуют о том, что перераспределение напряжений в природном массиве горных пород также способно порождать оба типа сейсмической эмиссии: серии дискретных импульсов и непрерывный шумоподобный или даже гармонический сигнал [34–36]. Сейсмическую и акустическую эмиссию можно рассматривать как акустическую манифестацию процесса аккомодации твердых материалов к внешнему силовому воздействию. Информация о процессах самоорганизации в твердом теле, сопровождающихся формированием различных диссипативных структур, содержится в сейсмических и акустических фоновых колебаниях. Пространственные особенности диссипативного процесса аккомодации можно наблюдать с помощью эмиссионной томографии с использованием многоканальной регистрации, а временные особенности процесса самоорганизации с использованием разработанного автором статьи метода оценки степени упорядоченности режима колебаний по точечным наблюдениям [16, 37–40].

Индикатор степени упорядоченности режима колебаний показывает, что за некоторое время до возникновения землетрясений и образования трещины гидроразрыва пласта наблюдается всплеск упорядоченности режима колебаний, что говорит о включении процесса самоорганизации. После деструктивного события происходит возвращение к норме упорядоченности. Также с использованием индикатора степени упорядоченности режима колебаний установлено, что трехосном нагружении керна сухого песчаника в волновом акустическом поле формируются генетически связанные диапазоны частот, существенно разнесенные по спектру, но имеющие сходную динамику [40]. Последний факт обосновывает возможность использования эмиссионной томографии для исследования расположенных на больших глубинах геологических объектов – процессы, протекающие на больших глубинах на микроуровне можно наблюдать на поверхности по низкочастотному излучению (единицы и десятки Гц), динамически синхронно связанному с высокочастотным акустическим излучением (десятки кГц и более). Существует теоретический механизм, объясняющий эту эмпирически обнаруженную связанность [39].

Примером интенсивного техногенного воздействия на массив горных пород является процесс гидроразрыва пласта, который используется для увеличения темпа

отбора нефти из продуктивных пластов [41]. Азимут распространения трещины гидроразрыва, ее диаметр и степень раскрытия являются важной информацией для оптимизации разработки месторождения. Одним из способов получения полезной информации о результатах гидроразрыва является микросейсмический мониторинг процесса создания трещины и последующего процесса фильтрации рабочего флюида в пласт. Микросейсмический мониторинг заключается в определении местоположения и времени возникновения микроземлетрясений, сопровождающих изменение напряженно-деформированного состояния пласта, с использованием стандартных сейсмологических методов. Наблюдение сигналов от микроземлетрясений проводят в соседних скважинах или с дневной поверхности. При таком мониторинге анализируются сейсмические проявления процесса аккомодации массива к внешней нагрузке в радиусе первых сотен метров от зоны перфорации.

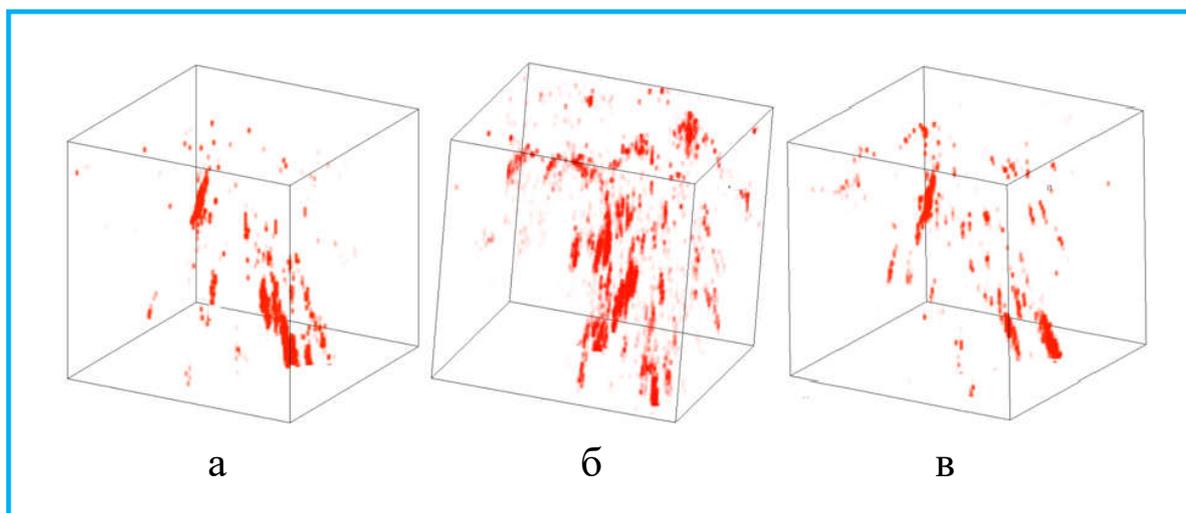


Рис. 4. Визуализация глубинных сейсмических источников методом эмиссионной сейсмической томографии по записям сейсмического фона, зарегистрированного на поверхности: а – до; б – во время; в – после гидравлического разрыва пласта [42]. Размер ребра исследуемого объема 3 км

Эмиссионная томография работает с более слабыми сигналами, чем микроземлетрясения – с пространственно когерентной составляющей сейсмического шума. Это позволяет исследовать тонкую структуру изменения напряженно-деформированного состояния среды на времени роста напряжений и на времени их релаксации на большом удалении от области перфорации. Важным экспериментальным

фактом наших исследований является то, что при локальном техногенном воздействии на природный массив при гидроразрыве существенно меняется конфигурация активных эмиссионных кластеров в большом объеме среды (в диаметре нескольких километров) и по-разному в разных диапазонах частот [42].

По записям сейсмического фона до гидроразрыва «высвечиваются» стационарные эмиссионные зоны, через которые происходит диссипация фоновых воздействий (приливных, тектонических деформаций и пр.), рис. 4а и рис. 5а. На времени роста давления в процессе закачки рабочей жидкости массив пород приспосабливается к изменению потока энергии ростом количества излучателей и изменением положения кластеров эмиссионных источников, рис. 4б и рис. 5б. Резкое изменение пространственного распределения эмиссионных источников можно рассматривать как бифуркацию с возникновением новой пространственно-временной диссипативной излучающей структуры. Через сутки после гидроразрыва среда возвращается к фоновому распределению источников (рис. 4в).

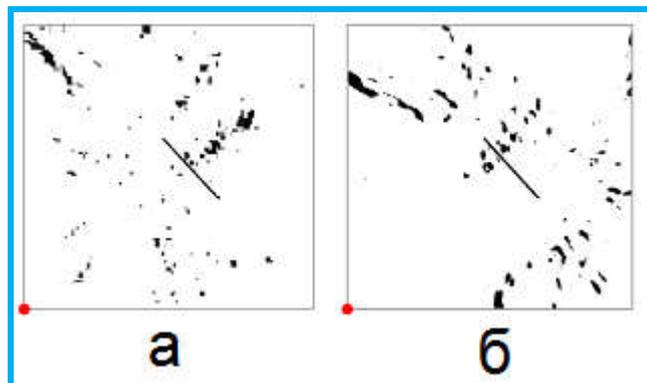


Рис. 5. Срезы трехмерных изображений на глубине расположения горизонтального ствола скважины: а – до начала работ (рис. 4а); б – на времени повышения давления (рис. 4б).

Изменение напряженно-деформированного состояния по сравнению с фоновым приводит к «высвечиванию» новых эмиссионных источников, не выявляемых ранее в фоновом состоянии, (рис. 4–6). Из анализа эмиссионных изображениях видно, что среда ощущает внешнее воздействие на достаточно большом удалении от зоны перфорации, которая расположена в центре исследуемого объема. Сильное возмущение источников происходит во всем объеме. На расстоянии 2,5 км от точки воздействия и, возможно, еще далее, проявляются области активизации, через которые происходит сброс, более

активная диссипация избыточной энергии. Из этого следует что, при проведении гидроразрыва в радиусе нескольких километров можно попутно проводить оперативную доразведку остаточных запасов, распределения низкопроницаемых пропластов и интенсивной открытой трещиноватости.

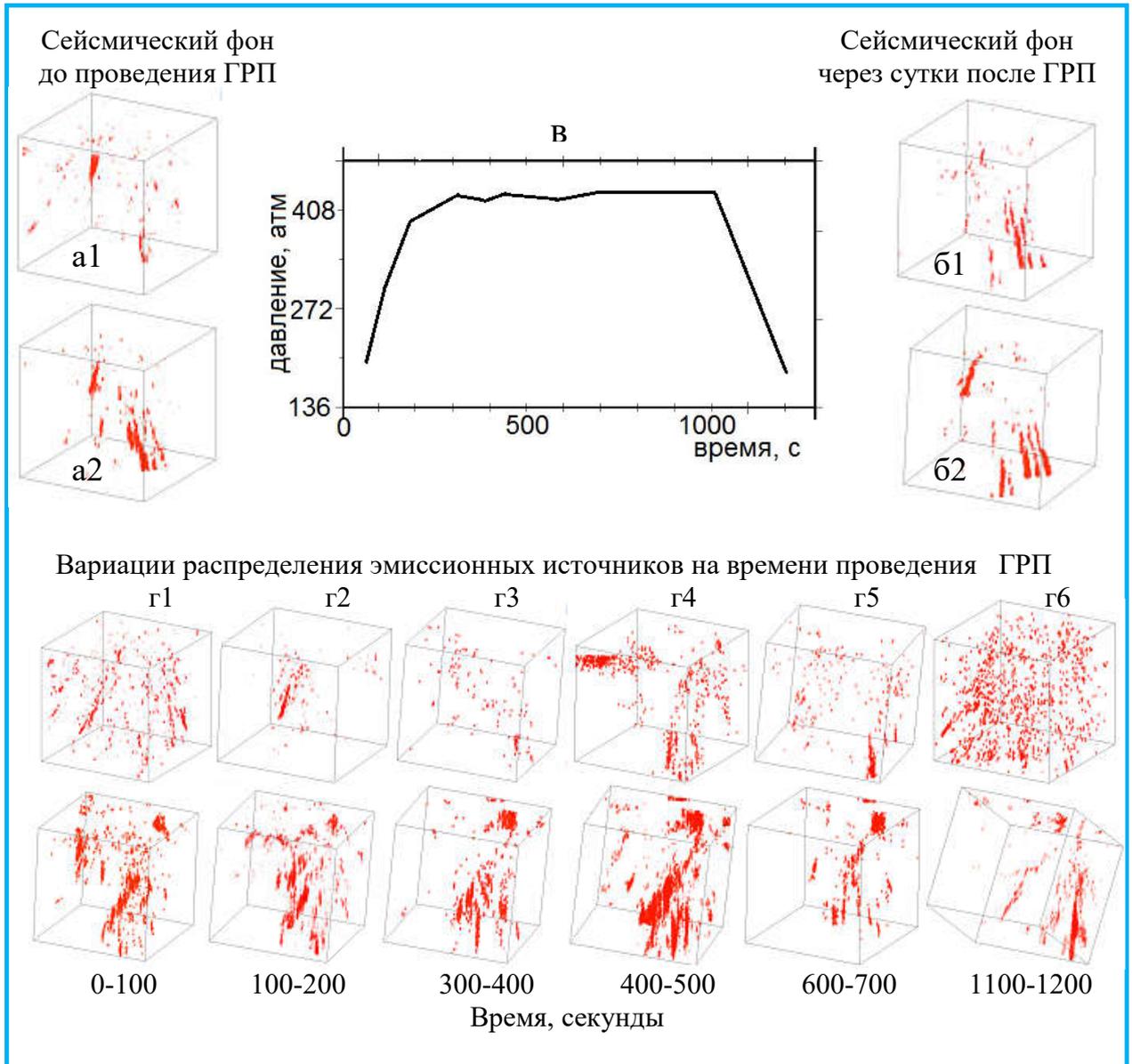


Рис. 6. Изображения распределений эмиссионных источников: а – до, б – после; г – на времени работ по гидроразрыву пласта в последовательные интервалы времени; в – кривая изменения давления. В группах изображений верхний ряд соответствует диапазону частот 60–100 Гц, нижний ряд – диапазону частот 40–60 Гц. Размер ребра исследуемого объема – 3 км

Из приведенных на рис. 6 изображений видно, что до и после интенсивного воздействия на среду в фоновом режиме, распределение эмиссионных кластеров в соседних диапазонах частот (40–60 Гц и 60–100 Гц) примерно одинаково. При внешнем воздействии процесс диссипации в соседних диапазонах частот существенно отличается, что, видимо, связано с тем, что в этих диапазонах частот высвечиваются процессы релаксации разных мезоуровней (рис. 6г1 – рис. 6г6). В диапазоне 40–60 Гц изображение при нагружении достаточно устойчиво, активно «работает» зона в право-фронтальной части исследуемого объема. Вероятно, что так проявляется активизация подвижек в области повышенной трещиноватости пород.

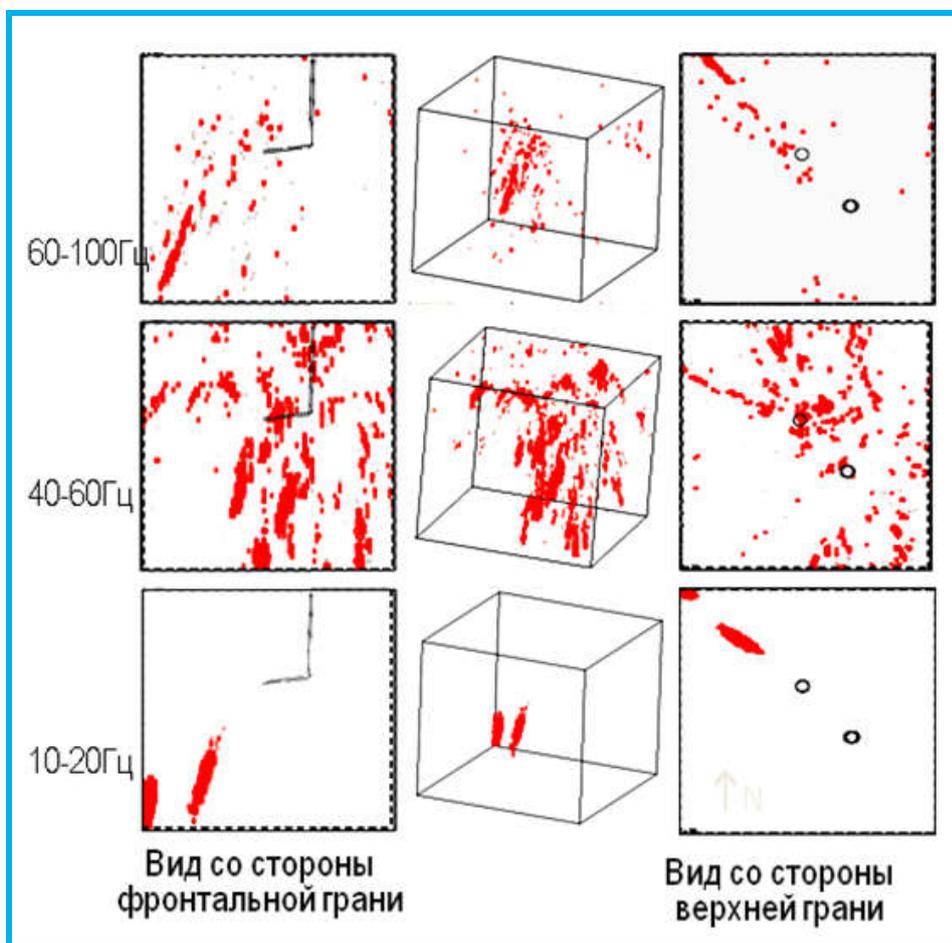


Рис. 7. Детальное изображение в разных проекциях исследуемого объема на времени наиболее сильного микроземлетрясения. Соответствует рис. 6г2. Локализация двух очагов сдвоенного микроземлетрясения на расстоянии более 2 км от зоны перфорации показана на изображениях нижнего ряда, в левом нижнем углу исследуемого объема среды

В самом верхнем диапазоне частот с течением времени изображения быстро и сильно меняются, происходит резкая смена геометрии пространственного распределения эмиссионных источников по всему объему.

Развитие технологии доразведки с достоверной интерпретацией выявленных при внешнем воздействии эмиссионных объектов требует дополнительных теоретических и экспериментальных исследований. В обнаруженных эффектах многое не ясно. В частности, не понятно почему в фоновом состоянии распределение эмиссионных кластеров в близких диапазонах частот (40–60 Гц и 60–100 Гц) очень похожи, а при техногенном воздействии полностью различаются. Причем сразу после снятия воздействия распределение интенсивности изображения в верхнем диапазоне частот становится равномерным – то есть в этом диапазоне частот все эмиссионные источники «гаснут».

Особого внимания достойны события, изображенные на рис. бг2. Более подробно, в разных проекциях, они показаны на рис. 7. На времени расчета этих изображений произошло наиболее сильное микроземлетрясение из всех, произошедших за время работ по гидроразрыву. Микроземлетрясение является сдвоенным событием, с гипоцентрами в левом нижнем углу исследуемого объема среды. Изображения очагов землетрясения визуализируются в диапазоне частот 10–20 Гц и показаны в нижней части рис. 7. В диапазоне частот 60–10 Гц, происходит стягивание эмиссионных источников в узкую полосу, что изображено в верхней части рис. 7. Так проявляется образование полосы деформаций, на конце которой и происходит деструктивное событие в виде микроземлетрясения. Интересный факт, что на частоте 40–60 Гц в области образования полосы деформаций наблюдается «сейсмическое затишье» – сигналы эмиссии на этих частотах отсутствуют, что видно на изображениях среднего ряда рис. 7. Вышеприведенные результаты показывают, что на времени техногенного воздействия и в процессе разработки месторождения с использованием эмиссионной томографии можно точно выявлять аварийно опасные объемы пласта.

Как отмечено в работах А.Н. Дмитриевского, месторождения углеводородов можно рассматривать в качестве пространственно-временные диссипативных структур, которые формируются в литосфере в «энергоактивных зонах Земли» [43–45], в геологическом времени на потоках энергии и массопереноса планетарного масштаба. Такие энергоактивные и флюидонасыщенные зоны могут быть областями генерации

нефти и газа, либо путями транзита, в которых происходит процесс накопления глубинных углеводородов. В статье А.Н. Дмитриевского, А.В. Каракина и И.Е. Баланюк [46], а также в последующих работах этих авторов сформулирована идея, что зоны разуплотнения в коре Земли (горизонтальные коровые волноводы и вертикальные высокопроводящие зоны деструкции) являются путями транспортировки природных флюидов и расплавов. Предложен механизм, в результате которого возможно накопление углеводородов в промышленных масштабах. Независимо от пути генезиса нефти (биогенного или абиогенного), для формирования залежи нефти необходимы определенные условия: наличие ослабленной зоны транспортировки флюида, внешний подток углеводородов (с верхних или нижних горизонтов), плотные непроницаемые покрышки – флюидоупоры и ловушки [47]. Как показывают приведенные далее экспериментальные результаты, полученные автором при сейсмологических исследованиях, эмиссионная томография способна обеспечить обнаружение и локализацию таких геологических структур и изучение их эволюции, что является важным фактом для создания новых технологий и методов выявления зон нефтегазонакопления и перспективных объектов.

К настоящему времени автором статьи разработаны и опробованы алгоритмы и методики анализа сейсмических данных, позволяющие проводить исследования с использованием эмиссионной томографии в диапазонах глубин литосферы Земли. При изучении больших глубин эмиссионная томография позволяет детально локализовать как горизонтальные, так и вертикальные структуры с ослабленной прочностью пород, проследить временную изменчивость области эмиссионной активизации и изменение частотного состава излучения в связи с тектонической и флюидной активностью. Это может быть использовано, совместно с другими методами, для поиска месторождений полезных ископаемых на больших глубинах.

В качестве примера ниже приведены два результата локализации эмиссионных неоднородностей, подтвержденные независимыми исследованиями с использованием трансмиссионной (скоростной) томографии. Методами трансмиссионной томографии на тех же площадках исследований были выявлены низкоскоростные аномалии, совпадающие по положению с эмиссионными кластерами. При этом скоростная томография позволяет оконтурить зону пониженных скоростей, а эмиссионная томография выявляет тонкую пространственную структуру этой зоны.

При сейсмологических исследованиях в районе вулканического фронта, о. Хонсю, Япония, система наблюдений позволяла исследовать эмиссионную активности коры с хорошим пространственным разрешением до глубин 15 км [12]. Здесь были выявлены две наиболее крупные эмиссионные области. Одна совпадает с положением среднекорового магматического тела, для которого характерно наличие больших термических градиентов и флуктуаций давления, обусловленного магматической активностью. Другая эмиссионная неоднородность, показанная на рис. 7, совпадает с зоной пониженных скоростей и повышенного затухания, которая выявлена по независимым исследованиям японских сейсмологов [48, 49]. Здесь же концентрируются наиболее сильные современные и исторические землетрясения. Эта же область активизируется после прохождения волн от землетрясений [10]. Совокупность известных фактов позволяют предположить, что для этой области земной коры характерна повышенная трещиноватость и раздробленность. Согласно распределению эмиссионной активности по глубине (рис. 7б), выделенная зона может интерпретироваться как разлом, достаточно локализованный по латерали до глубин 6 км и перерастающий в протяженную в восточном направлении горизонтальную структуру на глубинах 6–15 км, что соответствует глубине среднекоровых волноводов. Изображения срезов эмиссионной области на глубине 11 км, рис. 7в, иллюстрируют временную изменчивость распределения эмиссионной активности перед локальными землетрясениями на глубине 10 км, но с разной локализацией эпицентров в горизонтальной плоскости. Вариации пространственного распределения эмиссионной активности связываются с вариациями напряженно-деформированного состояния коры Земли в связи с миграцией эпицентров землетрясений.

На рис. 8 показаны результаты исследования в масштабах литосферы Земли на территории центрального Тянь-Шаня, стационарная группа KNET. Система наблюдений и алгоритм с нелинейным формированием луча позволили получить эмиссионные изображения геосреды до глубины 150 км, что охватывает всю кору и верхний слой мантии [15]. На рис. 8б и рис. 8в приведены результаты, полученные при использовании трансмиссионной и эмиссионной томографии, которые показывают каким образом при использовании этих двух различных подходов проявляется на границе кора-мантия один и тот же геологический объект. На глубине 40–90 км, что соответствует переходной зоне кора-мантия, независимыми исследованиями по скоростной томографии [50] выявлена

яркая низкоскоростная аномалия (рис. 8б). По результатам эмиссионной томографии в центре горизонтальных срезов изображений среды на рис. 8в четко проявляется структура узких вертикально вытянутых неоднородностей, форма которой в плане близка к кольцевой. На больших глубинах изображение центральной структуры размывается, а на меньших существенно видоизменяется [15].

Для центрального Тянь-Шаня характерен расслоенный тип земной коры, характеризующийся наличием волноводов и электропроводящих слоев, чья повышенная удельная проводимость связывается с поступлением горячих растворов из нижних горизонтов через субвертикальные зоны, соединяющие эти горизонты. На геоэлектрическом разрезе прослеживается прогиб электропроводящих структур до глубин более 80 км. Анализ вариаций поля поглощения короткопериодных сейсмических волн в этом районе показал, что перед сильными землетрясениями в нижней коре и мантии формируются области повышенного поглощения поперечных волн и существенные временные вариации структуры поля поглощения, что объясняется активной миграцией ювениального флюида в нижней части коры и верхней мантии. Последнее предполагает наличие высокопроницаемых вертикальных каналов, насыщенных флюидом и мантийных корней разломов. Проявившаяся на эмиссионных изображениях литосферы на глубинах 40–90 км кольцевая система квазивертикальных структурных неоднородностей может быть системой высокопроницаемых деструктивных зон, обеспечивающих внедрение мантийного флюида в кору. Через них также возможны потоки с обратной направленностью флюида, обеспечивающие перемешивание вещества в коре и мантии.

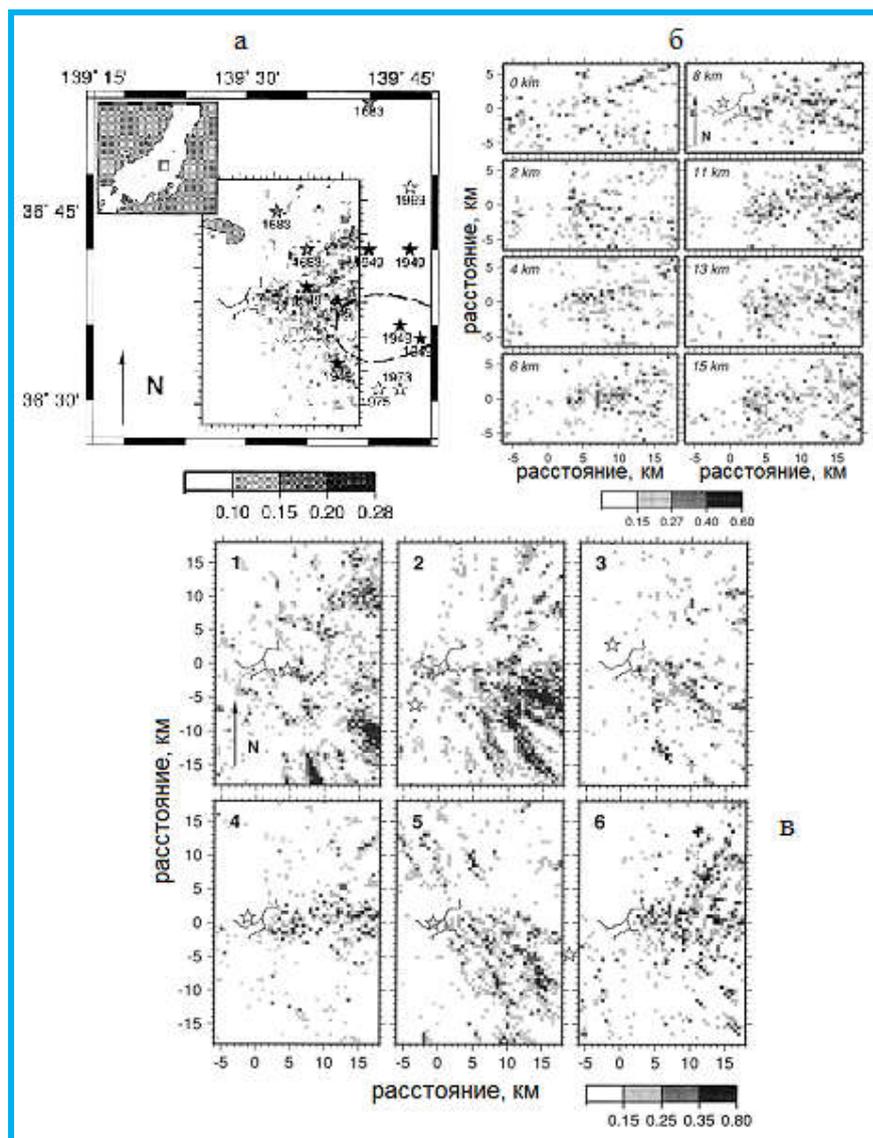


Рис. 7. Изображение области сейсмической эмиссии в районе вулканического фронта, о. Хонсю, Япония, при визуализации по поперечным волнам [8, 12]. Разной градацией серого цвета отмечены участки изображений среды, значение яркости которых превышает доверительный интервал. Цифры шкалы яркости – значение отношений мощностей когерентной и некогерентной компоненты сейсмического фона в процентах.

- а – схема района наблюдений, на которой показан усредненный по 6 изображениям срез эмиссионного кластера на глубине 11 км, штриховая линия оконтуривает положение низкоскоростной аномалии и области повышенного затухания, согласно работам [48, 49], звездочки помечают положение эпицентров сильных ($M=5-7$) исторических и современных землетрясений по JMA-каталогу;
- б – срезы для глубин 0–15 км изображения эмиссионной области по записям фона перед землетрясением 4 рис. 7в;
- в – вариации для разных дней распределения эмиссионной активности на глубине 11 км, звездочки показывают положение локальных землетрясений, которым предшествовала использованная запись сейсмического фона

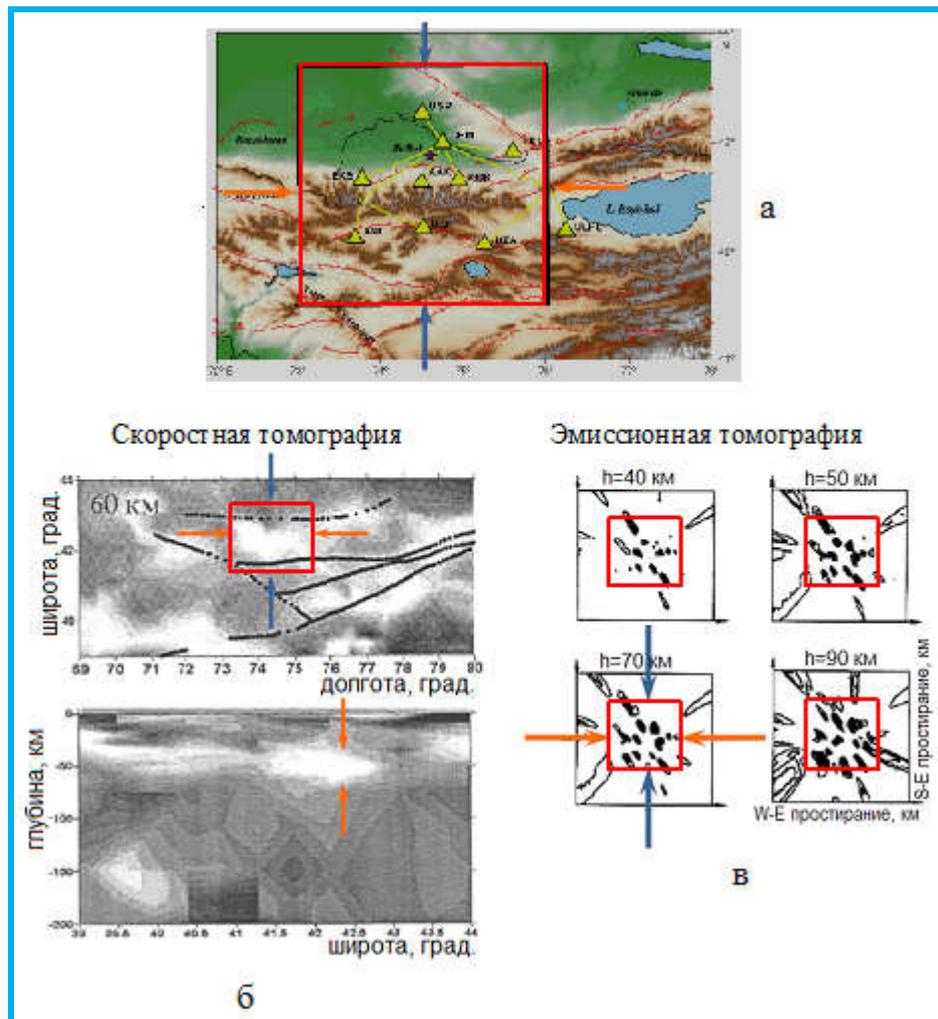


Рис. 8. Комплексный томографический подход к исследованию геологических объектов, отражающий различные свойства одного и того же объекта в эмиссионных и трансмиссионных портретах, центральный Тянь-Шань, Киргизия: а – схема площадки исследований; б – горизонтальный (60 км) и вертикальный срез скоростной модели по трансмиссионной томографии из работы [50]; в – горизонтальные срезы исследуемого объема по результатам эмиссионной томографии на глубинах 40–90 км [15]. Стрелками и квадратной рамкой помечено положение выявленного объекта, который выделяется как низкоскоростная аномалия по трансмиссионной томографии и как структура тонких вертикальных неоднородностей по эмиссионной томографии

Выводы

1. Эмиссионная томография позволяет исследовать строение массива горных пород и поводить мониторинг геофизических процессов, связанных с релаксацией геосреды при изменении напряженно-деформированного состояния пород в результате природных и техногенных воздействий импульсного, шумоподобного или периодического характера.

2. При проведении гидроразрыва пласта и других работ с интенсивным техногенным воздействием на пласт в диапазоне нескольких километров возможна доразведка зон открытой трещиноватости, нефтяных ловушек и выявление аварийно опасных зон (динамически неустойчивых блоков, участков разломов и больших трещин).

3. При разработке месторождений эмиссионная томография позволяет оценивать степень возмущения напряженно-деформированного состояния пласта по сравнению с исходным, отслеживать необратимые изменения или корректировать темпы разработки для компенсирования изменений в состоянии пласта в нужном направлении.

4. Показана возможность разработки технологии трехмерного оконтуривания разломных зон с использованием «подсветки» сигналов от вибратора или техногенной помехи, возникающей на эксплуатируемых месторождениях. При этом могут быть использованы мобильные регистрирующие группы бескабельных сейсмических модулей.

5. Существующие алгоритмы и методики обработки сейсмических данных позволяют проводить исследования в диапазонах глубин литосферы Земли. При исследовании больших глубин эмиссионная томография позволяет детально локализовать как горизонтальные, так и вертикальные структуры с ослабленной прочностью пород, проследить временную изменчивость области эмиссионной активизации и изменение частотного состава излучения в связи с тектонической и флюидной активностью. Это может быть использовано, совместно с другими методами, для поиска месторождений полезных ископаемых на больших глубинах, для создания новых технологий и методов выявления зон нефтегазонакопления и перспективных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николаев А.В., Троицкий П.А, Чеботарева И.Я. Способ сейсмической разведки: А.с. 1000962 СССР. № 3213796, Заявл. 08.12.80; Оpubл. 28.02.83 // Открытия, изобретения. 1983. № 8. 4 с.

2. Николаев А.В., Троицкий П.А., Чеботарева И.Я. Изучение литосферы сейсмическими шумами // ДАН СССР. 1986. Т. 282. № 9. С. 586–591.
3. Nikolaev, A.V., Troitskiy, P.A. Lithospheric studies based on array analysis of P-coda and microseisms // Tectonophysics . 1987. Vol. 140. P. 103–113.
4. Александров С.И., Рыкунов Л.Н. Шумовой мониторинг в Южной Исландии // Доклады РАН. 1992. Т. 326, № 5. С. 808–810.
5. Arnason K., Flovenz O.G. Evaluation of physical methods in geothermal exploration of rifted volcanic crust // Geotherm. Resour. Counс., 1992. Trans.16. P. 207–214.
6. Furumoto M., Kunitomo T., Inoue H., Yamaoka K. Seismic Image of the volcanic tremor source at the Izu-Jshima volcano, Japan // Volcanic Seismology / Edit. Gasparini P., Scarpa R., Aki. K. Springer-Verlag, New-York. 1992. P. 201–211.
7. Чеботарева И.Я., Николаев А.В. Сато Х., Шиоми К. Источник сейсмической эмиссии, связанный с магматическим телом в районе вулканического фронта, о. Хонсю, Япония // Вулканология и сейсмология. 1997. № 2. С. 58–73.
8. Чеботарева И.Я., Николаев А.В. Сато Х. Исследование источников сейсмической эмиссии в земной коре (Япония, сев. Канто) // Доклады РАН. 1997. Т. 357, № 4. С.542–546.
9. Шубик Б.М., Ермаков А.Б. Автоматическое определение координат и моментов возникновения сейсмических событий, основанное на принципах эмиссионной томографии // Проблемы геотомографии / Под ред. А.В. Николаева. М: Наука, 1997. С. 189–202.
10. Чеботарева И.Я., Николаев А.В. Исследование неоднородностей земной коры кода-волнами землетрясений // Доклады РАН. 1999. Т. 364, № 6. С. 816–820.
11. Chouet B., Saccorotti G., Dawson P., Martini M., De Luca G., Milana G., Cattaneo M. Broadband measurements of the sources of explosions at Stromboli volcano, Italy // Geoph. Res. Lett. 1999. Vol. 26, No 13. P. 1937–1940.
12. Tchegotareva I.I., Nikolaev A.V., Sato H. Seismic Emission Activity of Earth's Crust in Northern Kanto, Japan // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2000. Vol. 120, No 3. P. 167–182.
13. Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. Локация источников сейсмического шума, связанного с проявлением гидротермальной активности, методом эмиссионной томографии // Физика Земли. 2004. N 2. С. 66–81.

14. Чеботарева И.Я. Методы пассивного исследования геологической среды с использованием сейсмического шума // Акуст. журн. 2011. Т. 57, № 6. С. 844–853.
15. Чеботарева И.Я. Алгоритм сейсмической эмиссионной томографии при ослаблении пространственной корреляции сигнала // Вестник МГОУ. Естественные науки. 2011. № 1. С. 101–107.
16. Чеботарева И.Я. Структура и динамика геосреды в шумовых сейсмических полях. Методы и экспериментальные результаты // Акустика неоднородных сред: Ежегодник Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2012. Вып. 12. С.147–156
17. Чеботарева И.Я. Трассировка лучей в методе сейсмической эмиссионной томографии // Радиопромышленность. 2017. №1. С.19–25
18. Чеботарева И.Я. Определение положения точки преломления на интерфейсах сложной геометрии при трехмерной трассировке лучей // Вопросы радиоэлектроники. 2017. №3. С.141–144
19. Чеботарева И.Я., Кушнир А.Ф., Рожков М.В. Устранение интенсивной помехи при пассивном мониторинге месторождений углеводородов методом эмиссионной томографии // Известия РАН. Сер. «Физика Земли». 2008. № 12. С. 65–82
20. Чеботарева И.Я. Новые алгоритмы эмиссионной томографии для пассивного сейсмического мониторинга разрабатываемых месторождений углеводородов. Часть I. Алгоритмы обработки и численное моделирование // Физика Земли. 2010. № 3. С. 7–36.
21. Чеботарева И.Я. Новые алгоритмы эмиссионной томографии для пассивного сейсмического мониторинга разрабатываемых месторождений углеводородов. Часть II. Результат обработки реальных данных // Физика Земли. 2010. № 3. С. 30–36.
22. Садовский М.А., Николаев А.В. Новые методы сейсмической разведки. Перспективы развития // Вестник АН СССР. 1982. № 1. С. 57–64.
23. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М: Наука, 1987. 100 с.
24. Пономарев В.С. Горные породы как среды с собственными источниками упругой энергии // Проблемы нелинейной сейсмологии / Под ред. А.В. Николаева и И.Н. Галкина . М: Наука, 1987. С. 50–64.
25. Николаев А.В. Проблемы нелинейной сейсмологии // Проблемы нелинейной сейсмологии. М.: Наука , 1987. С. 3–20.

26. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Часть 1 (464 с.); Часть 2 (360 с.).
27. Лукк А.А., Дещеревский А.В., Сидорин А.Я., Сидорин И.Я. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. М: ОИФЗ РАН, 1996. 210 с.
28. Гольдин С.В. Деструкция литосферы и физическая мезомеханика // Физическая мезомеханика. 2002. Т. 5, № 5. С. 5–22.
29. Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Данилов В.И. и др. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-е., 1990. 225 с.
30. Панин В.Е., Сергеев А.В., Панин А.В. Наноструктурирование поверхностных слоев конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий. Томск: изд-во Томск. Политехн. ун-та, 2010. 254 с.
31. Панин В.Е., Сергеев А.В., Панин А.В. "Шахматный" мезодефект интерфейса в гетерогенных средах в полях внешних напряжений // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9, № 6. 5–15.
32. Jorand C., Chemenda A. I., Petit J-P. Formation of parallel joint sets and shear band / fracture networks in physical models // Tectonophysics. 2012. Vol. 581. P. 84–92.
33. Баранов В.М. Акустические измерения в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
34. Анцыферов М.С., Анцыферов Н.Г., Коган Л.Л. Сейсмические исследования и проблема прогноза динамических явлений. М.: Наука, 1971.
35. Сбоев В.М. Исследование микросейсмической эмиссии, возникающей в образцах горных пород. Новосибирск: Препринт ИГД СО АН СССР, 1988. N 22. 67 с.
36. Хаврошкин О.Б. Некоторые проблемы нелинейной сейсмологии. М: ОИФЗ РАН, 1999. 286 с.
37. Чеботарева И.Я, Володин И.А. Критерий степени упорядоченности режимов автоколебаний для анализа динамики геофизической среды // Доклады РАН. 2010. Т. 432, N 1. С. 115–119.
38. Чеботарева И.Я, Володин И.А. Метод локализации сейсмических источников, сигналы которых отличаются по степени упорядоченности от фонового шума // Доклады РАН. 2011. Т. 437, N 3. С. 393-397.

39. Володин И.А., Чеботарева И.Я. Сейсмическая эмиссия в зонах техногенных воздействий // Акустич. журн. 2014. Т. 60, № 5. С. 505–517.
40. Чеботарева И.Я., Володин И.А., Дрягин В.В. Акустические эффекты при деформировании структурно неоднородных сред // Акустич. журн.. 2017. Т. 63, № 1. С.84–93.
41. Economides M., Oligney R., Valko P. Unified fracture design. Bridging the gap between theory and practice. Alvin. Texas: Orsa Press, 2002. 200 P.
42. Чеботарева И.Я., Володин И.А. Образы процесса гидроразрыва пласта в сейсмическом шуме // Докл. РАН. 2012. Т. 444, № 2. С. 202–207.
43. Дмитриевский А.Н. Фундаментальные проблемы геологии нефти и газа: Акад. чтения на учен. совете Академии, 19 апр. 1994 г. М.: ГАНГ им. И.М. Губкина, 1995. 15 с.
44. Дмитриевский А.Н. Прогноз, поиск и разведка нефти и газа – фундаментальные исследования // Актуальные проблемы прогноза, поисков и освоения углеводородных ресурсов земных недр: Сб. ст. юбил. науч. сессии, посвящ. 80-летию ВНИГРИ. СПб.: ВНИГРИ, 2009. С. 14–35.
45. Дмитриевский А.Н. Энергетика, динамика и дегазация земли // Актуальные проблемы нефти и газа [Электронный ресурс]. 2010. Вып. 1(1). 22 с. – Режим доступа: <http://oilgasjournal.ru/> (Дата обращения 29.11.2017 г.)
46. Дмитриевский А.Н., Каракин А.В., Баланюк И.Е. Концепция флюидного режима в верхней коре (гипотеза корового волновода) // Доклады АН . 2000. Т. 374, № 4. С 534–536.
47. Дмитриевский А.Н., Шустер В.Л., Пунанова С.А., Самойлова А.В. Моделирование геологического строения и механизмов формирования и размещения скоплений нефти и газа в доюрских комплексах Западной Сибири // Актуальные проблемы нефти и газа [Электронный ресурс]. 2012. Вып. 2(6). 20 с. – Режим доступа: <http://oilgasjournal.ru/> (Дата обращения 29.11.2017 г.)
48. Tsumura N. 3-D attenuation structure beneath the NE Japan arc based on the simultaneous determination of source parameters and Q values // PhD Thesis. Science. Tohoku Univ. Sendai. Japan. 1994. 340 p.

49. Matsumoto S., Hasegawa A. Distinct S wave reflector in midcrust beneath Nikko-Shirane Volcano in the northeastern Jahan arc // J. Geoph. Res. 1996. Vol.101, N B2. P.3067–3083.

50. Усольцева О.А., Санина И.А. Модели для непрерывной среды с В-сплайн аппроксимацией // Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью: Сб. ст. / Под ред. А.Б. Бакирова. Бишкек: Илим, 2006. С.18–31.