

**О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПАССИВНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ
ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ СКОПЛЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ**

И.А. Володин, Э.Р. Казанкова, И.Я. Чеботарева
ИПНГ РАН, e-mail: volodin@ipng.ru

Процессы эволюционных преобразований геологической среды в значительной степени контролируются физическими полями в недрах Земли. Показано, что этот контроль осуществляется согласно известному принципу максимальной диссипации. В результате этого спектры сейсмической эмиссии содержат информацию об этих преобразованиях, в том числе о свойствах коллекторов, тектонической структуре среды, напряженном состоянии и флюидодинамике среды. На этой основе разработана технология, состоящая из комплекса геофизических методов нового поколения. К ним относятся: 1) эмиссионная сейсмическая томография (построение объемных изображений источников и определение спектрального состава излучения из них); 2) комплексирование трансмиссионной (скоростной) и эмиссионной сейсмической томографии; 3) выделение напряженных зон литосферы по степени хаотизации сейсмического шума; 4) локализация объектов по критерию упорядоченности колебаний относительно фона; 5) выделение дизъюнктивных нарушений в литосфере на основе анализа смещений спектра излучений внешних источников. Все методы были проверены на численных моделях и протестированы на реальных объектах. Обоснована возможность комплексирования методов путем их сравнительного анализа на конкретных объектах. Комплекс позволяет решать принципиально новые задачи поисков, разведки, а также разработки месторождений нефти и газа.

1. Физические основы формирования эмиссионного излучения твердой фазой геологической среды

Длительное энергетическое воздействие на геологическую среду приводит к ее преобразованию и переформированию коллекторов до состояния структурной зрелости. При этом часть потока энергии преобразуется в поле сейсмоакустической эмиссии. На основе современных данных о взаимодействии структурированных сред с физическими полями может быть описан класс физических и физико-химических процессов, связанных с преобразованием пород-коллекторов под действием потоков энергии в литосфере:

- при воздействии на вещество волновыми полями энергия возбуждения его молекулярной структуры перекачивается из оптического и инфракрасного диапазона в террагерцевые (ТГц) частоты;
- в потоке энергии ТГц – поле возбуждает акустические моды МГц – частот с характерной длиной волны 0.1–0,01 мм и электромагнитную стоковую компоненту Мандельштама — Бриллюэна ТГц-диапазона;
- при накоплении энергии на возбужденных ТГц-уровнях в течение большого промежутка времени на стационарном потоке энергии происходит частотно зависимый нелинейный рост коэффициента электрострикции;
- в результате рассеяния возбуждающего излучения на колебаниях элементов структуры коллектора возникает вынужденное глобулярное рассеяние электромагнитного поля (ВГР);
- дополнительно происходит усиление электромагнитной компоненты Мандельштама — Бриллюэна, также связанной с собственной частотой зерна, то есть в потоке энергии происходит селективный отбор частот в результате комбинационного рассеяния на структуре среды.

Это приводит к тому, что на потоке энергии средней плотности достигается порог генерации собственных механических колебаний элементов коллектора, а коэффициент преобразования возбуждающего излучения в ВГР может достигать более 50%, формируя МГц – поле акустических автоколебаний среды.

В качестве модели структурированной геологической среды рассматривается гетерогенная система, состоящая из различных по физическим свойствам или химическому составу частей, фаз, отделенных друг от друга физическими поверхностями раздела. В гетерогенной системе геологической среды границы разных фаз ограничивают элементы микроструктуры, отдельные звенья системы, представляющие однородные по составу объемы геологической среды с границами, в том числе элементов обломочного материала, зерен, объемов, частично ограниченных трещинами, фрагментов карбонатных пород и т.д. Такие элементы микроструктуры будем называть зернами, характерный диаметр которых может быть различен. Описанные ниже воздействия окружающей среды порождают в зернах режим автогенерации звука, вызывая их высокочастотные колебания. Передача энергии зернам может происходить по разным каналам, например через гиперзвук, электромагнитное поле, силы Ван-дер-Ваальса, химическими связями.

Основная же энергия взаимодействия между зернами передается через упругие связи на контактах между ними. Звук, генерируемый в зернах, частично отражается от границы зерна, сохраняя внутри него часть акустической энергии, превращая каждое зерно в **резонатор - автогенератор**. Заметим, что формируемые спектры частот для разных зерен разные, вследствие различий между самими зернами вследствие микронеоднородности геологической среды. Сформированные моды являются так называемыми «оптическими» модами, независимыми друг от друга. Особый интерес представляют основные моды, на которые падает основная доля энергии автогенератора. Длина волны основной

моды колебаний зерна сравнима с его диаметром, а частота – с отношением скорости волн в зерне к диаметру.

С течением времени в результате столкновений между колеблющимися зернами происходит их «абразивная» обработка, переработка обломочного материала, а также образование усталостных трещин, что приводит к раздробленности зерен. В описанных в литературе экспериментах наблюдалась термодиссипация на контактах зерен: в микрообъемах при процессе деформирования температура может достигать, по-видимому, 1000 °С, о чем свидетельствует обнаруженное экспериментально наличие фазовых превращений. В течение длительного времени температура выравнивается и составляет несколько десятков градусов. В процессе деформирования происходит активирование поверхностного слоя, способствующее совместно с действием температур протеканию физико-химических реакций. Дальнейшее действие ударных нагрузок приводит к образованию и отделению частиц износа, которые вносят вклад в формирование цемента и «глинистости» породы. В поверхностной зоне протекают процессы адсорбции, диффузии, адгезии, химических реакций и механического перемешивания. В условиях установившегося малого и среднего износа достигается равновесное состояние поверхностной зоны. Существование такого термодинамически равновесного состояния предполагает, что при изнашивании зоны она должна восстанавливаться до равновесных размеров. Таким образом, происходит преобразование как зерен породы, так и связывающего цемента.

При достаточно большом объеме таких преобразований (энергии и времени, в течение которого зерна коллектора будут откалиброваны), характерных для глубокозалегающих месторождений, возникают благоприятные условия для кластерной синхронизации осцилляторов (фазового перехода второго рода, перехода Курамото) – коллективных сейсмоакустических и электромагнитных эффектов, привязанных к коллекторским свойствам породы. При этом, с одной стороны, в этих кластерах изменяется режим преобразо-

ваний породы и дальнейшие механизмы эволюции определяются фреттингом: комплексом механических, физических и химических процессов, имеющих место в районе контакта двух соприкасающихся твердых тел, когда между ними существует относительное циклическое движение с амплитудой, не превышающей определенную величину.

Важно отметить, что только после синхронизации появляется возможность коллективных эффектов в динамике структурированной среды, что соответствует акустическим и сейсмическим колебаниям. Амплитуды акустических и сейсмических мод существенно выше, чем у оптических, которые «зажаты» между соседними зернами, что приводит к существенному увеличению диссипируемой средой энергии. Здесь следует упомянуть **принцип максимальной диссипации** [4]: «Система без структур может диссипировать такое количество энергии, которое задается микроскопическими процессами диссипации. Тогда, если система со структурой обладает большей диссипацией, то такая структура возникает спонтанно...» В нашем случае этот процесс и связан с фазовым переходом Курamoto в нелинейной динамике геологической среды, а его результат является структурой, излучающей акустические моды эмиссионного излучения. Сейсмические же моды эмиссионного излучения являются дальнейшим развитием этого процесса, связанного с низкочастотной модуляцией акустических мод, что позволяет еще больше увеличивать амплитуду колебаний и энергию рассеяния. Такие когерентные структуры с более высокой диссипацией, являющиеся результатом так называемой модуляционной неустойчивости, при наличии шума могут возникать спонтанно как дальнейшие фазовые переходы второго рода в кластерах синхронизации динамики среды. Их появление существенно зависит от однородности соответствующих участков геологической среды, размеров кластеров.

В связи с большими временами взаимодействий между зернами матрицы породы происходит выравнивание, приведение к константе параметров среды, на неоднородностях которых происходит диссипация энергии. При этом формируются новые параметры

порядка диссипативной структуры, что определяет ход ее эволюции, а также происходят дополнительные эволюционные изменения литологии геологической среды, приводящие к появлению новых качественных особенностей. С этой точки зрения эмиссионное сейсмоакустическое излучение является отражением собственной эволюции геологической среды, а его спектр отражает стадию этой эволюции, поэтому содержит параметры структуры среды.

Описанные выше кластеры становятся источниками сейсмического эмиссионного излучения, спектр каждого из которых, генетически связанный с коллекторскими свойствами, можно определить методом эмиссионной сейсмической томографии. Это дает возможность изучать свойства пород-коллекторов на больших глубинах пассивными геофизическими методами с дневной поверхности.

Возможность такого подхода проиллюстрирована на примере о-ва Хонсю (Япония). Выделение в сейсмическом шуме составляющей спектра с глубины 10 км позволяет предположить наличие трещинного коллектора и установить некоторые его важные характеристики по конфигурации полученного спектра.

Пример. Методами эмиссионной сейсмической томографии определяется спектр эмиссионного излучения, идущего с каждой отдельной глубины. На рис. 1 приведены нормированные спектры мощности сейсмической эмиссии для приповерхностных источников и глубин $H=10-13$ км. Видно наличие кратных гармоник в спектре эмиссионного излучения, идущего с большой глубины, в отличие от хаотического спектра (а) поверхностного излучения. Согласно построенной модели, показанный на рисунке спектр характерен для модуляционной неустойчивости Лайтхилла, что соответствует флюидонасыщенному трещиноватому коллектору. По другим данным, на этой глубине находятся изверженные породы.

Если q – параметр относительной пористости, d – коэффициент раскрытия трещины, l – средний диаметр трещины, то параметр коллектора $f = ql/d^{1/2}$, расположенного на глубине ≈ 10 км, **может быть определен методом эмиссионной сейсмической томографии**. Теоретический анализ показывает, что данный параметр имеет вид: $f = [0,4(c_{ac}/c_s)(bc_0/\Omega A_0)]^{1/2}$, где c_{ac}/c_s – отношение скоростей акустических и сейсмических волн; Ω – частота (рис. 1b) максимальной амплитуды A_0 , которая определяется из сравнительного анализа амплитуд волн от глубоких и поверхностных источников; определяемые в лаборатории в целом (не разрушенном) образце изверженной породы c_0 – скорость гиперзвука и b – параметр квадратичной нелинейности его деформации.

Таким образом, для больших глубин **сейсмическим исследованиям становятся доступными литологические параметры** геологической среды. В частности, в спектре частот от 100 Гц до 10 кГц можно наблюдать даже структуру порового пространства, благодаря хлопающим режимам колебаний на слабо сжатых контактах с дробными степенями нелинейности. С увеличением глубины разностные частоты формируют модуляцию на все более низких частотах, доступных для исследований с дневной поверхности.

2. О нефтегазоносности глинистых толщ на больших глубинах

Фактические данные о распространении геотермических условий позволяют более обоснованно оценивать запасы жидких и газообразных углеводородов на больших глубинах. Для изучения эволюционно-динамических процессов в коллекторах введено понятие «седиментационно-динамическая модель коллектора», основанное на соотношении критериев: скорости осадконакопления, динамики переноса и седиментации осадков с учетом уровня моря и волнового базиса. Термин «пласты-коллекторы» является условным, поскольку на изменение коллекторских свойств, особенно на больших глубинах, сильно влияют повсеместно развитые системы трещин.

Описанная выше возможность идентификации трещинных коллекторов по данным сейсмической томографии является существенной основой для создания прямых геофизических методов поиска и разведки месторождений нефти и газа на больших глубинах. Однако для решения таких задач необходима детализация условий формирования месторождений на таких глубинах.

Статистический анализ пористости и проницаемости различных литологических разностей пород по глубинам для ряда основных нефтегазоносных провинций показал, что на больших глубинах коллекторами могут быть любые осадочные породы, в том числе и глинистые. Глинистые породы за счет потери пластичности, имея низкие пределы прочности на сжатие и растяжение, в первую очередь предрасположены к глубинному трещинообразованию, процессам разуплотнения, вызываемым дилатансией, сопровождаемым интенсивным растворением и выщелачиванием наименее устойчивых минералов.

Более высокие коллекторские характеристики глубокопогруженных глинистых пород по сравнению с таковыми безглинистых разностей объясняются различиями их постседиментационных преобразований на поздних стадиях катагенеза в условиях больших глубин. В них при высоких температурах и давлениях интенсифицируются процессы выщелачивания карбонатного вещества и других минералов при воздействии высвобождаемой с поверхности глинистых минералов физически и химически связанной воды, обладающей аномальными свойствами и химической агрессивностью. Присутствие органического вещества в глинах, являющихся мощным катализатором, еще более резко усиливает протекание химических реакций. В безглинистых разностях терригенных пород на больших глубинах наблюдается опережающая перекристаллизация с уменьшением объема пустот и цементация порового пространства вторичными карбонатами и другими аутигенными минералами при циркуляции в них минерализованных пластовых вод и продвижении флюидов, «отжатых» из глинистых пород. Феномен цементации песчаников и

алевролитов, контактирующих с глинистыми породами, широко распространен в меловых, юрских и триасовых терригенных отложениях Западной Сибири, в том числе и в разрезе Тюменской сверхглубокой скважины. Значительная часть песчаников, характеризующаяся высокой проницаемостью, попав в зону катагенеза, на глубине более 4 км вследствие аутигенной минерализации стала практически непроницаемой; в ней практически отсутствует связь коллекторских параметров с гранулометрическими характеристиками. Кроме того, в наиболее проницаемых нефтенасыщенных песчаниках происходит запечатывание порового пространства твердыми битумами. Например, в тюменской свите на глубине 4,0–4,1 км поровое пространство песчано-алевролитовых пород заполнено асфальтенами, повторяющими конфигурацию первичных пор.

Наоборот, на больших глубинах глинистые коллекторы часто нефте- и газонасыщены. Так, в Аралсорской глубокой скважине на глубине 4764 м выявлен нефтенасыщенный аргиллит с пористостью 9%, а глинистые алевролиты при наличии нефтенасыщения на глубине 4,5 км имеют пористость 12%, в то время как при отсутствии нефти – до 9%. В Тимано-Печорской глубокой опорной скважине глинистые коллекторы представлены в ряде интервалов. Наиболее интересны глинистые доманикиты (интервал 3595–3824 м) и глубинные глинистые трещинные коллекторы в толщах, расположенных под интрузиями долеритов (глубина более 5,1 км). В ряде скважин Западно-Соплесской площади пласты доманикитов характеризуются как нефтегазонасыщенные. В некоторых из них при испытании доманиковых отложений были получены значительные притоки нефти и газа.

В нижнедевонских отложениях, вскрытых Колвинской глубокой параметрической скважиной, высокими емкостными свойствами обладают аргиллиты, у которых пористость достигает 14 %, в то время как у карбонатных пород того же возраста она не превышает 5 %. С ростом глинистости пород здесь наблюдается увеличение открытой пористости. Интерес представляют глинистые пласты, залегающие на глубине более 4602 м непо-

средственно под интрузиями долеритов, являющихся идеальной покрывкой. Газонасыщенность установлена по результатам комплексной интерпретации методов геофизических исследований скважин. В Прикаспии в подсолевой толще Акжар-Актюбинской зоны пористость песчаников и алевролитов не превышает 10%, известковистых разностей – 1%, а аргиллиты обладают пористостью, достигающей 16,5, а иногда и 24%.

При температурах 100–120 °С в недрах встречаются залежи легкой нефти, при 125–150 °С – большей частью газоконденсатные и газовые залежи, а при 150–175 °С нефтяные залежи не отмечены. Сопоставление геотермических градиентов различных районов позволяет оценить вероятные предельные глубины нахождения нефти и газа. Так, температуре 180 °С при геотермических градиентах 1,5 и 3,5 °С/100 м соответствуют глубины 11,3 и 4,8 км. Для западной и юго-западной частей Прикаспийской впадины на территории Волгоградской и Астраханской областей палеотемпературный градиент подсолевых отложений составляет 2 °С/100 м. Предельная глубина залегания зон нефтенакпления при этом градиенте составит 6,5 км, конденсата – 9,5 км, а газа – 14 км и более. На глубинах 5–10 км возможно образование как нефтяных залежей с высоким газовым фактором, так и газоконденсатных.

3. Локализация объектов по критерию степени упорядоченности колебаний относительно фона

Новый пассивный геофизический метод связан с локализацией эндогенных объектов, сейсмических источников, с использованием критерия степени упорядоченности режимов сложных колебаний относительно фонового шума на базе перенормированной энтропии. Метод позволяет локализовать глубинные источники, сигнал от которых отличается по степени хаотизации от фонового шума. При этом не используется информация о скоростной модели и измерения волнового поля проводятся последовательно в точках ре-

гистрации по профилю или площади, а не одновременно, что является принципиальным положительным отличием нового метода от традиционных методов локализации источников. Метод был опробован для решения задачи локализации по записям сейсмического шума приповерхностного грязевулканического резервуара, расположенного на глубине 1.0–1.5 км и являющегося флюидонасыщенной гетерогенной системой с повышенными нелинейными свойствами.

В работе [20] критерий степени упорядоченности, предложенный Ю.Л. Климонтовичем [21] в рамках теории открытых систем, был успешно использован при анализе временной изменчивости состояния геосреды по записям сейсмического шума и были выявлены интервалы увеличения степени упорядоченности фоновых колебаний в окрестностях серий сильных землетрясений. В данной работе показано, что критерий степени упорядоченности может быть использован для картирования глубинных источников сигналов, степень хаотизации которых отличается от нормы хаотизации сейсмического шума, а также для оценки глубины залегания и относительной мощности излучения этих источников.

Точность локализации источников в предложенном методе зависит от многих параметров: кривизны фронта сейсмической волны в реальной среде, шага регистрации вдоль профиля, диаграммы направленности излучения, степени стационарности шума и эндогенного излучения, спектров излучения и методов их оценки. Получить аналитическое выражение точности локализации с учетом всех параметров достаточно сложно. Так как коэффициент α определяется кривизной фронта сейсмической волны, то грубую оценку точности можно получить из оценки ширины сейсмического луча, которая вытекает из принципа Гюйгенса–Френеля. При конечной величине длины волны λ физический сейсмический луч определяется как эллипсоидальный объем с фокусами в концах луча оптимального (в смысле принципа Ферма) луча длины L , с максимальным диаметром

нормального сечения $\delta_{\max} = 2\sqrt{\lambda L/8}$ [22]. Длины всех лучей внутри эллипсоидального объема отличаются от L не более чем на $\lambda/4$; следовательно, диаметр нормального сечения на уровне концов оптимального луча $\delta_0 \approx \lambda/2$. Эту величину δ_0 можно выбрать в качестве оценки точности определения горизонтальной координаты глубинного источника и шага расстановки приборов вдоль профиля. Приведенные ниже результаты локализации по экспериментальным данным и их хорошее совпадение с результатом независимой локализации другим методом с заявленной точностью $\lambda/4$ свидетельствуют о том, что наша оценка точности локализации близка к реальной.

При экспериментальном опробовании метода были использованы сейсмические записи, сделанные вдоль геофизического профиля над грязевым вулканом горы Карабетова. Измерения производились последовательно во времени в 19 точках с шагом около 420 м. Профиль был заложен таким образом, чтобы он пересекал субмеридиональную систему разломов. Были использованы записи вертикальной составляющей волнового поля. Полоса частот регистрации 0.03–10 Гц. Ранее методом микросейсмического зондирования по низкочастотной части записей (<1 Гц) под вершиной горы была выявлена узкая вертикальная низкоскоростная зона, ассоциируемая с флюидонасыщенным подводным каналом, область питания которого находится на глубине 4.5–9 км, а на глубине 0.8–1.5 км выделена низкоскоростная зона, интерпретируемая как приповерхностный грязевулканический резервуар [23]. Сейсмический материал, представленный в упомянутой выше работе, был использован в настоящей работе. При этом обрабатывался не только низкочастотный диапазон записей (<1 Гц), но и высокочастотный. В отличие от метода микросейсмического зондирования, основанного на обработке поверхностных волн, преобладающих в низкочастотном диапазоне, наш метод ориентирован на обработку объемных волн, поэтому мы можем использовать весь диапазон, в котором излучают источники. Ис-

пользование высокочастотного диапазона позволяет существенно улучшить точность локализации источников.

Модель грязевулканической камеры состоит из 3 групп некогерентных точечных источников, одна из которых имеет вертикальное простирание, а две другие – горизонтальное, причем отношение мощностей излучения горизонтальных групп несколько возрастает по мере удаления от вертикального канала. Экспериментальные результаты хорошо описываются моделью с вертикальным каналом и двумя боковыми камерами, расположенными в диапазоне глубин 0.8–1.6 км. Центральная часть построенной модели в точности совпадает с положением низкоскоростной неоднородности, выявленной в работе [4]. Вследствие применения различных методов и различных диапазонов частот результаты являются независимыми. Их хорошее совпадение, обнаруженное в процессе обработки данных, является подтверждением достоверности полученных результатов. Наш метод выявил наличие дополнительных горизонтально протяженных деталей излучателя. Это различие связано с тем, что метод работы [23] ориентирован на выделение вертикальных неоднородностей и плохо «видит» тонкие неоднородности с горизонтальным простиранием. В используемом в данной работе методе локализации оценка глубины источника и его геометрии достаточно грубая, но существенным преимуществом метода является то, что вместо площадной сейсмической группы можно использовать одноточечную последовательную регистрацию вдоль профиля или по площади, что несравнимо по финансовым затратам с площадной регистрацией. Также при построении алгоритма описанного нового метода не используется информация о скоростном разрезе среды, которая необходима и сильно влияет на результат локализации при использовании подавляющего большинства других методов. Несомненно, что кривизна фронта сейсмической волны определяется трехмерным распределением скоростей; однако приведенные экспериментальные резуль-

таты показывают, что усреднение эффекта по объему обеспечивает удовлетворительную точность локализации по крайней мере до глубины 2 км.

При поиске и исследовании эндогенных объектов метод локализации на основе критерия степени относительной упорядоченности режимов колебаний может быть использован на предварительном этапе детектирования и картирования глубинных объектов по их излучению; при этом легко могут быть обследованы большие площади. Затем на выделенных площадках можно проводить исследования с помощью более дорогостоящей и трудоемкой площадной регистрации, нацеленные на детальное изучение выявленных объектов, например методом сейсмической эмиссионной томографии.

4. Выделение дизъюнктивных нарушений в литосфере на основе анализа смещений спектра излучений внешних источников

Задача картирования разломов и трещинных коллекторов не может считаться полностью разработанной в рамках сейсморазведки, ориентированной на реконструкцию отражающих горизонтов. Обычно разломы выявляются на этапе интерпретации, как резкие изменения по глубине положения оси синфазности. Это приводит к тому, что разломы, не имеющие смещений, вообще могут быть не обнаружены сейсморазведочными методами, но могут быть выявлены системой методов пассивного сейсмического мониторинга, разработанной авторами отчета. Алгоритмы эмиссионной томографии и другие разработанные методы пространственно-временного анализа геосреды реализуются, в основном, в пассивном режиме. Они полезно используют глубинную составляющую сейсмического шума – излучение, генерируемое в переменном поле естественных (тектонических, приливных) и искусственных (шумящая скважина, закачка жидкости в пласт, сейсмический вибратор) напряжений в областях ослабленной прочности: разломные зоны, крупные трещины, границы контакта блоков, пористые и трещинные коллекторы.

По результатам описанных в данной работе исследований обнаружено, что в местах дизъюнктивных нарушений литосферы происходит захват разломной зоной и нелинейная трансформация излучения от любых внешних источников. Нелинейная трансформация внешнего излучения приводит к уширению его спектра. На базе этой особенности развита методика, позволяющая использовать для выявления положения разломных зон подсветку внешней помехой или передвижным вибратором при регистрации волнового поля на поверхности многоканальной сейсмической группой.

В работе были использованы записи непрерывных сейсмических наблюдений на разрабатываемом Лебяжьем месторождении Красноленинского свода. Общее количество датчиков приемной группы составляло 60. Геофоны располагались в скважинах на глубинах 5–7 м. При расчете сейсмоземиссионных изображений сейсмические записи подвергались предварительной частотной фильтрации. Получена информация о распределении по частотам энергии наиболее мощных когерентных источников, формирующих волновое сейсмическое поле, а также зависимости от частоты значений трех наибольших собственных чисел спектральной матрицы волнового поля типа I в диапазонах частот 10–30 и 30–50 Гц. Так как наибольшие собственные числа связаны с энергетическим вкладом в волновое поле от наиболее мощных когерентных источников, то зависимость от частоты наибольших собственных значений определяется частотным спектром наиболее мощных сигналов. Величины собственных значений быстро спадают с ростом частоты от 10 до 20 Гц. В диапазоне 20–30 Гц спектр начинает спадать гораздо медленнее, а в диапазоне 30–50 Гц он становится еще более стабильным. Такие особенности могут быть объяснены тем, что в волновом сейсмическом поле на высоких частотах преобладают совсем другие когерентные источники, отличные от источников на низких частотах. Если при расчете сейсмоземиссионных изображений выровнять вклад различных частот, то это будет спо-

способствовать подавлению вклада низкочастотного излучения и подчеркиванию зон с более «богатым» спектром.

На рис. 2 приведены полученные изображения сейсмических источников для записей типов I, II и III в диапазоне частот 10–50 Гц и записи типа I в диапазоне частот 30–50 Гц. Для записей с интенсивной техногенной помехой в диапазоне 30–50 Гц четко просматривается излучающая структура, расположенная на глубинах более 3 км, что свидетельствует о том, что в высокочастотном волновом поле преобладает излучение от глубинных источников (рис. 2б). Расширение частотного диапазона в сторону низких частот до 10–50 Гц позволяет выявить новые детали – появляются низкочастотные источники в верхней части разреза. Глубинная структура проявилась на изображениях среды именно благодаря наличию техногенной подсветки. Излучающая система имеет сложное слоистое строение, хорошо просматривается в присутствии интенсивной пульсирующей помехи (рис. 2а, рис. 2б, рис. 2в) и коррелирует с положением разлома. Узкие, изогнутые параллельные поверхности проявляют, в основном, широтное простирание, и главные детали квазивертикальны. На временном интервале без интенсивной техногенной помехи глубинная структура данным алгоритмом не выделяется (рис. 2г). Согласно работе [Глухманчук, 2005], в излучающей зоне исследуемого объема проходит разлом с широтным простиранием. Именно этот разлом, расположенный под центральной частью площадки наблюдений, виден при подсветке техногенной помехой на рис. 2а – рис. 2в.

Установлено, что излучение источников в верхней части разреза является более низкочастотным, чем излучение источников в нижней части разреза. То есть захваченное разломной зоной низкочастотное техногенное излучение, распространяясь по волноводу вниз, возбуждает в кристаллическом фундаменте пульсирующие деформации, генерирующие в консолидированной нижней части разреза высокочастотное излучение – сейс-

мическую эмиссию. Как отмечалось ранее, происхождение эмиссии может быть связано с активизацией флюидной активности или быть результатом нелинейной перекачки энергии техногенной помехи на другие частоты [Руденко, 1986]. В работе [Павленко, 2009] показано, что при прохождении достаточно мощного узкополосного шума через нелинейные грунты энергия частот входных сигналов переходит не только в низкочастотную, но и в высокочастотную область спектра. Идеи механизма трансформации сейсмического излучения в более высокочастотное изложены также в работах В.Н. Николаевского. Мощность осадочного чехла в районе исследований составляет 2900–3700 м. Разломы в кристаллическом фундаменте приводят к возникновению над ними зон разуплотнения и в осадочном чехле, но при этом контраст скоростей на границе зоны разуплотнения меньше, чем в более консолидированном фундаменте. При распространении по низкоскоростному волноводу вверх низкочастотное излучение должно интенсивно просачиваться через границы зоны разуплотнения и рассеиваться на скоростных неоднородностях, видимых в верхней части разреза на рис. 2а – рис. 2в.

Обнаруженное явление захвата и переизлучения разломной зоной излучений от внешних источников дает возможность полезно использовать внешний сейсмический сигнал для выявления разломов с помощью передвижного вибратора и мобильной сейсмической группы. Перемещение сейсмовибратора по площади и расчет изображений среды для различных положений вибратора обеспечивают выделение разломной зоны при попадании источника сейсмического сигнала на область разлома. При этом оптимальные параметры излучения выбираются в соответствии с ожидаемыми параметрами разломной зоны.

5. Комплексование трансмиссионной и эмиссионной сейсмической томографии

Методы трансмиссионной (скоростной) и эмиссионной томографии, используя разные физические свойства объектов исследования, позволяют выявлять аномалии структуры среды и особенности напряженно-деформированного состояния. При этом используются разные физические эффекты, разные методы обработки и разные типы входных данных. Эти методы дополняют друг друга, и комплексные исследования с использованием двух типов томографий позволяют существенно повысить точность и достоверность результатов обоих методов. Детальная скоростная модель, получаемая на выходе трансмиссионной томографии, позволяет существенно улучшить качество изображений среды в эмиссионной томографии – повышается контрастность изображения и более точно локализуется положение источников излучения. Пространственное распределение неоднородностей, полученное с помощью эмиссионной томографии, обеспечивает физическую обоснованность параметризации модели в трансмиссионной томографии. Зависимость от скоростной модели качества фокусировки в эмиссионной томографии позволяет оценить степень адекватности скоростной модели на выходе трансмиссионной томографии. Сравнение распределений аномалий повышает достоверность результатов.

Именно последнее утверждение иллюстрирует представленная работа. Ниже будут приведены результаты исследования литосферы Земли в районе Центрального Тяньшаня с помощью метода эмиссионной томографии, а также проведено сравнение их с результатами исследования этого района методом трансмиссионной томографии. Выявлен один и тот же объект двумя типами томографий: трансмиссионная томография выделяет объект как низкоскоростную аномалию, а эмиссионная томография детализирует его строение в виде структуры тонких вертикальных рассеивающих неоднородностей.

Метод эмиссионной сейсмической томографии [11] был разработан для локализации источников слабых шумоподобных сигналов, являющихся компонентой сейсмического шума или коды землетрясений и взрывов. Метод позволяет выделять как зоны ак-

тивной эмиссии, так и области рассеяния сейсмических сигналов. В результате компьютерной обработки получается трехмерное изображение источников излучения в виде «облака», заполняющего излучающую область среды. В основе алгоритма, описанного в работе [11], лежит процедура линейного формирования луча (beamforming). Этот алгоритм широко используется в сейсмологии при исследованиях в областях геотермальной, вулканической и сейсмической активности.

Пространственный масштаб доступного для исследования объема среды зависит от линейного размера регистрирующей группы датчиков: при необходимости изучения больших глубин апертуру приемной группы необходимо пропорционально увеличивать. При увеличении пространственного разнесения регистрирующих приборов, особенно в районах с сильной латеральной неоднородностью среды, корреляция сигнала по группе сильно ухудшается. Показано, что в таких условиях необходимо использовать модификацию метода эмиссионной томографии на базе нелинейного формирователя луча [15].

Эффективность алгоритма, описанного в работе [15], иллюстрирует натурный тест – результаты локализации источника продольных волн местного землетрясения по записям сейсмической сети с большой линейной апертурой (KNET). Были получены разными способами изображения землетрясения с гипоцентром на глубине 40 км в плоскости источника. Показано, что в полосе частот 3–15 Гц с помощью алгоритма с линейным формирователем луча положение источника землетрясения выявить невозможно – распределение интенсивности в изображении равномерно. При переходе к более низкому диапазону (0.3–2 Гц) в распределении интенсивности появляется максимум, хотя и весьма нечеткий. Дополнительная предобработка данных с помощью LTA/STA-фильтра [16] существенно улучшает результат. Физический смысл использованной предобработки – переход от слабокоррелированных высокочастотных волновых форм к высококоррелированным низкочастотным функционалам от регистрируемых сигналов. Использование алгоритма с

нелинейным формирователем луча позволяет существенно улучшить результат при локализации источника землетрясения без предобработки данных LTA/STA-фильтром.

На рис. 3 показаны результаты, полученные при анализе методом эмиссионной томографии с нелинейным формирователем луча сейсмических записей шума и коды местных землетрясений, зарегистрированных Киргизской широкополосной сейсмической сетью. KNET состоит из небольшого числа регистрирующих станций, однако линейные размеры сейсмической сети достаточно велики, чтобы обеспечить хорошее пространственное разрешение при построении изображений литосферы до глубины 150 км. Изображения строились в полосе частот 0.1–2 Гц. Использовалась слоистая скоростная модель среды, состоящая из 9 слоев, со скоростями продольных волн, соответствующих модели M1, приведенной в работе [19]. Изображение среды рассчитывалось в виде набора срезов для глубин 0–150 км по площади 500x500 км. Ориентация сторон плоских срезов север – юг и восток – запад, центр привязан к центральному датчику группы ААК.

Как видно из сравнения рис. 3а и рис. 3б, пространственное положение зон рассеяния сейсмических волн в диапазоне глубин 0–30 км для коды и сейсмического шума весьма схоже и отражает геометрию особенностей поверхностного горного рельефа. На глубинах 50–90 км, что соответствует для района исследований переходной зоне кора – верхняя мантия [6], картина пространственного распределения источников изменяется. В центре горизонтальных срезов четко проявляется структура узких вертикально вытянутых неоднородностей, форма которой в плане близка к кольцевой, что особенно хорошо видно на изображениях, построенных по записям шума. На больших глубинах изображение центральной структуры размывается. Отличия изображений для коды местных землетрясений и сейсмического шума связаны с различным характером подсветки – помимо спектральных различий, для шума волновое поле изотропно, а кодовое излучение преобладает со стороны источника.

Известные данные свидетельствуют о наличии в месте проведения наблюдений интенсивных восходящих флюидных потоков. 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 [7]. Литосферные скоростные вариации в районе наблюдений, к востоку от Таласо-Ферганского разлома, обусловлены неоднородностью состава или температур [19]. Скорость поперечных волн в коре Центрального Тянь-Шаня на глубине 10–35 км на несколько процентов ниже, чем за его пределами, а переход от верхней мантии к коре происходит в более широком интервале глубин, что связывается с вертикальной интрузией мантийного материала в кору [17]. В этом же районе наблюдается аномалия поляризации поперечных волн [18], которая может быть объяснена тем, что течение мантии в этом районе отличается от пассивной реакции на сжатие, характерной для Западного Тянь-Шаня, и обуславливается наличием восходящей термической аномалии (мантийного плюма) и мелкомасштабной конвективной ячейки. Анализ вариаций поля поглощения короткопериодных сейсмических волн в этом районе [10] 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 обстоятельство предполагает наличие высокопроницаемых вертикальных каналов, насыщенных флюидом, и мантийных корней разломов.

При построении трехмерной скоростной модели земной коры Тянь-Шаня на основе использования времен пробега P- и S-волн от местных и удаленных землетрясений выявлены такие особенности скоростного строения очаговых зон сильных землетрясений, как

волноводы, субвертикальные ослабленные «каналы» и высокоскоростные тела, к которым приурочены очаги сильных землетрясений [12, 13]. По скоростной томографии под горными хребтами до глубин 35–50 км выявляются однородные объемы пониженных скоростей с повышенным поглощением, а в переходной зоне кора – мантия – наличие аномально низких скоростей продольных волн, что связывается с внедрением в кору разогретого мантийного вещества и может рассматриваться как развитие мантийного плюма, ответвления Тибетского плюма. Координаты низкоскоростной неоднородности по глубине и в плане совпадают с положением выявленной в данной работе на глубинах 50–90 км кольцевой структуры тонких вертикально вытянутых неоднородностей, что иллюстрирует рис. 4.

Как следует из вышеприведенных экспериментальных результатов, проявившаяся на изображениях литосферы на глубинах 50–100 км кольцевая система квазивертикальных рассеивающих неоднородностей может быть системой высокопроницаемых деструктивных зон, обеспечивающих внедрение мантийного флюида в кору и, возможно, потоков с обратной направленностью флюида, а также обеспечивающих перемешивание вещества в коре и мантии. Корреляция распределения неоднородностей с поверхностным рельефом также находит объяснение в связи с приуроченностью к горным хребтам низкоскоростных и сильнопоглощающих зон. Схожесть на всех глубинах изображений, полученных по шуму и коде, говорит о том, что проявившиеся в обоих случаях детали являются результатом рассеяния распространяющегося сейсмического излучения на латеральных неоднородностях среды. Известно, что в сейсмическом шуме в использованном диапазоне частот преобладает распространяющаяся компонента в виде штормовых микросейсм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. СПб.: Политехника, 1993. 391 с.

2. *Зайцев В.Ю.* О «неклассических» проявлениях микроструктурно-обусловленной акустической нелинейности на примере контактодержащих сред // *Нелинейные волны`2006* / отв. ред. А.В. Гапонов-Грехов, В.И. Некоркин. Н.Новгород, 2007. С. 170–190.
3. *Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю.* Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003. 496 с.
4. *Тараненко В.Б., Слексис Г., Вайсс К.О.* Пространственные резонаторные солитоны // *Диссипативные солитоны*. М, 2008. С. 169–200.
5. *Адамова А.А., Сабитова Т.М.* Трехмерная скоростная модель земной коры Тянь-Шаня // *Физика Земли*. 2004. № 5. С. 58–67.
6. *Беляевский Н.А.* Земная кора в пределах территории СССР. М.: Недра, 1974. 280 с.
7. *Брагин В. Д., Баталев В. Ю, Зубович А. В. и др.* О качественных связях современных движений с геоэлектрическим разрезом земной коры Центрального Тянь-Шаня и с распределением сейсмичности // *Геология и геофизика*. 2001. Т. 42, № 10. С. 1610–1621.
8. *Винник Л.П., Косарев Г.Л., Орешин С.И.* Модели для слоистой среды с использованием метода приемных функций, разработанного в ИФЗ РАН // *Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью*. Бишкек, 2006. С. 31–40.
9. *Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н.* Поглощающие свойства среды // Там же. С. 40–47.
10. *Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н.* Неоднородности поля поглощения коротко-периодных *S*-волн в литосфере Тянь-Шаня и Джунгарии и их связь с сейсмичностью // *ДАН*. 2010. Т. 433, № 6. С. 808–812.

11. Николаев А.В., Троицкий П.А., Чеботарева И.Я. Изучение литосферы сейсмическими шумами // ДАН. 1986. Т. 282, № 9. С. 586–591.
12. Сабитова Т.М., Адамова А.А. Сейсмотомографические исследования земной коры Тянь-Шаня // Геология и геофизика. 2001. Т. 42, № 10. С. 1543–1553.
13. Сабитова Т.М. Отражение геодинамических процессов в скоростной структуре земной коры и верхней мантии // Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью. Бишкек, 2006. С. 58–61.
14. Усольцева О.А., Санина И.А. Модели для непрерывной среды с В-сплайн аппроксимацией (алгоритмы разработаны в ИДГ РАН) // Там же. С. 18–31.
15. Чеботарева И.Я., Рожков М.В., Тагизаде Т.Т., Ерохин Г.Н. Способ микро-сейсмического мониторинга пространственного распределения источников эмиссии и рассеянного излучения и устройство для его осуществления: Патент РФ N2278401. 2006. 32 с.
16. Bungum H., Huseby E.S., Ringdal F. The NORSAR array and preliminary results of data analysis // Geophys. J. R. astron. Soc. 1971. Vol. 25, N 1. P. 115–126.
17. Kosarev G.L., Petersen N.V., Vinnik L.P., Roecker S.V. Receiver functions for the Tien Shan analog broadband network: contrasts in the evolution of structures across the Talasso-Fergana fault // J. Geophys. Res. 1993. Vol. 98. P. 4437–4448.
18. Makeeva L.I., Vinnik L.P., Roecker S.V. Shear-wave splitting and small-scale convection in the continental upper mantle // Nature. 1992. Vol. 358. P. 144–147.
19. Roecker S.V., Sabitova T.V., Vinnik L.P. et al. Three-dimensional elastic wave velocity structure of the Western and Central Tien Shan // J. Geophys. Res. 1993. Vol. 98, N 9. P. 15,779–15,795.
20. Чеботарева И.Я., Володин И.А. Критерий степени упорядоченности режимов автоколебаний для анализа динамики геофизической среды // ДАН. 2010. Т. 432, № 1. С. 115–119.

21. *Климонтович Ю.Л.* Статистическая теория открытых систем. М.: ТОО «Янус», 1995. Т. 1. 622 с.
22. Сейсмическая томография / под ред. Г. Нолета. М.: Мир, 1990. 416 с.
23. *Собисевич А.Л., Горбатиков А.В., Овсяченко А.Н.* Глубинное строение грязевого вулкана горы Карабетова // ДАН. 2008. Т. 422, № 4. С. 542–546.

ПРИЛОЖЕНИЕ

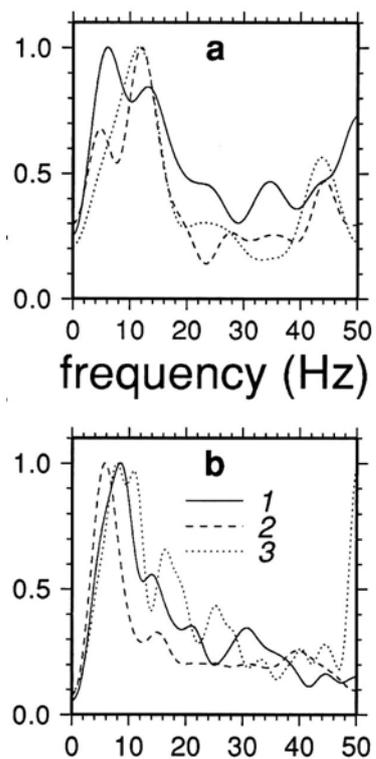


Рис. 1. Нормированные спектры мощности сейсмической эмиссии (поперечные волны) для образцов шума
a – для приповерхностных источников $H=0$; *b* – на глубине $H=10-13$ км. Цифры на кривых *b* соответствуют различным точкам фокусировки

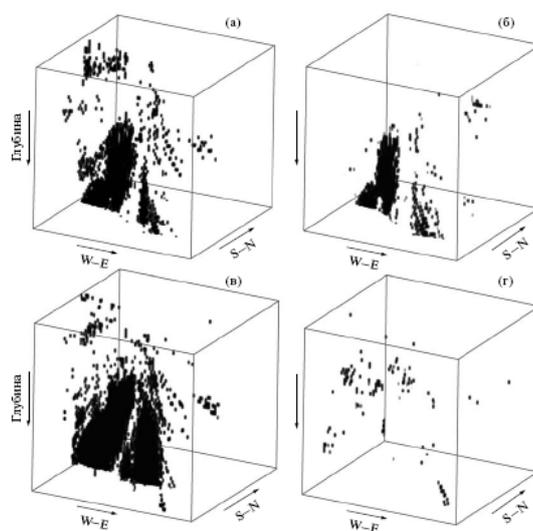


Рис. 2. Сейсмоземиссионные изображения, алгоритм с использованием простейшего группового фильтра и нормировкой на максимум перед суммированием матриц узкополосных изображений

a, в, г – для типов сейсмических записей I, II и III соответственно, диапазон частот 10–50 Гц; *б* – для записей типа I, диапазон частот 30–50 Гц

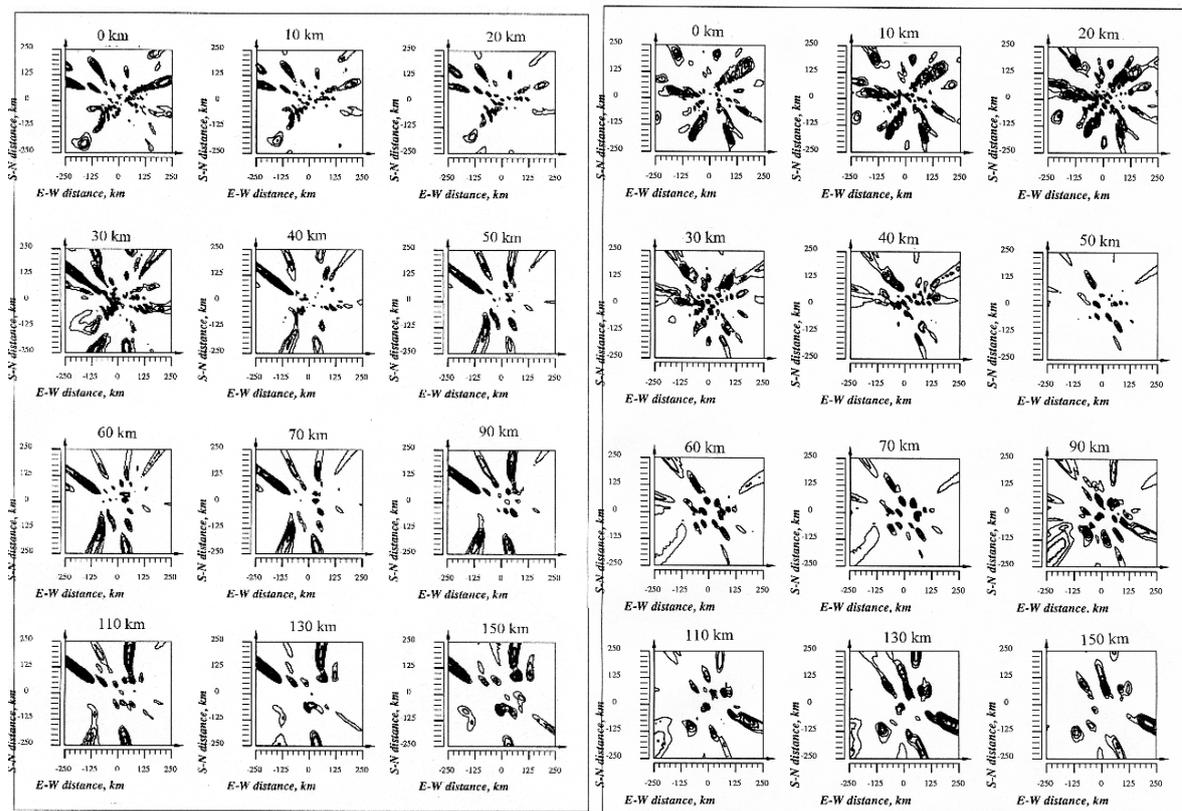


Рис. 3. Послойные горизонтальные изображения литосферы под сетью KNET по записям *a* – код местных землетрясений; *b* – код сейсмического шума для глубин 0–150 км (продольные волны), с предварительной частотной фильтрацией в полосе 0.1–2 Гц

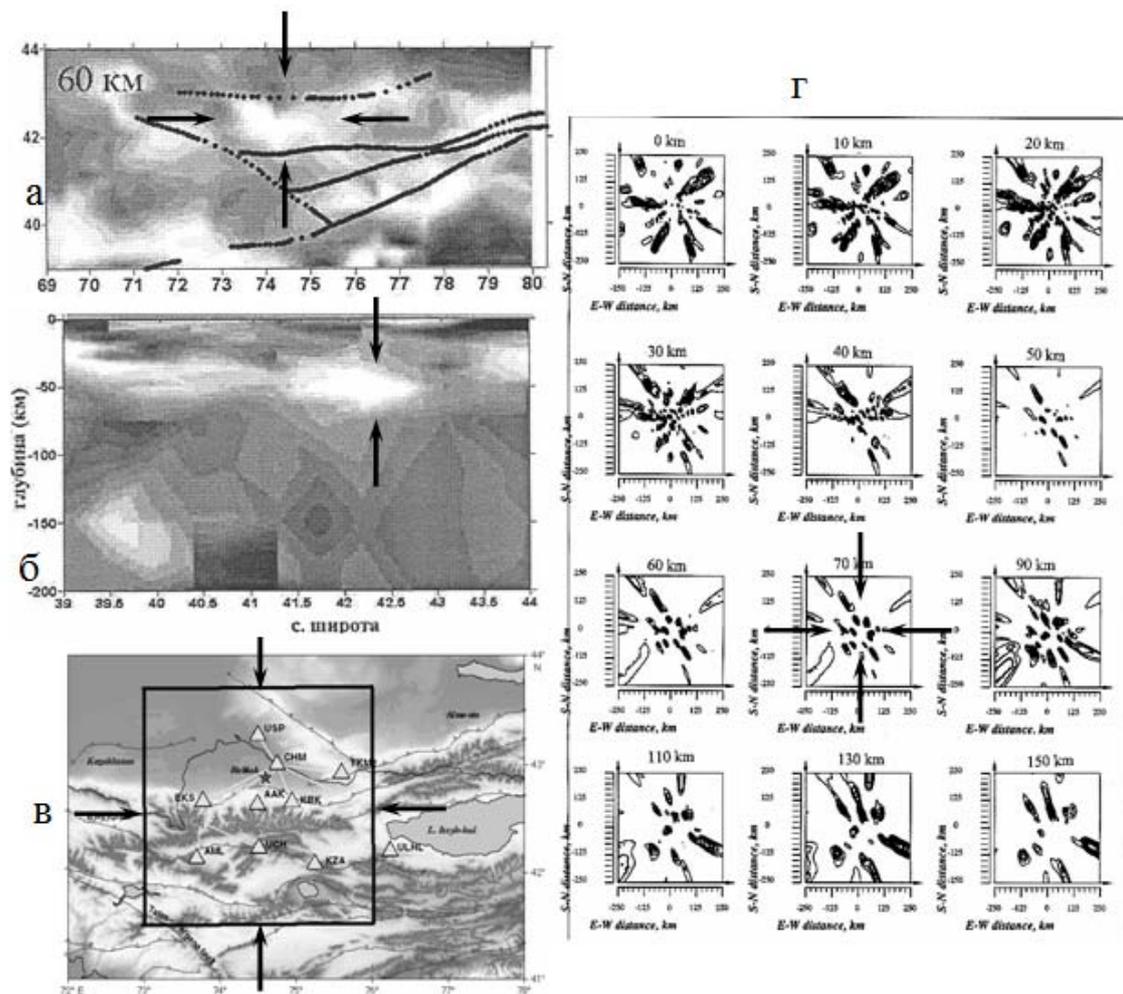


Рис. 4. Комплексный томографический подход к исследованию геологических объектов, отражающий различные свойства одного и того же объекта в эмиссионных и трансмиссионных портретах
а – горизонтальный и *б* – вертикальный срезы скоростной модели по трансмиссионной томографии, *г* – горизонтальные срезы среды по эмиссионной томографии, *в* – схема площадки исследований. Стрелками помечено положение выявленного объекта, который выделяется как низкоскоростная аномалия по трансмиссионной томографии и как структура тонких вертикальных рассеивающих неоднородностей по эмиссионной томографии (рис. 4а, б) [14].