

# ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ МИКРОСЕЙСМ НА ГЕОТРАВЕРСЕ «УРАЛСЕЙС»

В. И. Дубянский, К. Ю. Силкин

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 24 сентября 2010 г.

**Аннотация.** В работе исследованы динамические и спектральные свойства микросейсм на сейсмограммах МОВ ОГТ, полученных на геотраверсе «Уралсейс». Показано, что микросейсмическая составляющая сейсмических записей в виде «спектральных изображений» разреза содержит дополнительную информацию о структурных и геофизических свойствах земной коры.

**Ключевые слова:** сейсморазведка, микросейсм, спектральные изображения среды.

**Abstract.** This article demonstrates the results of investigations of the dynamic and spectral features of microseisms from CDP records on the «Uralseis» geotraverse. It was determined that "spectral images" of microseism components of seismograms contents additional important information about structure and geophysical features of the Earth crust.

**Key words:** seismic prospecting, microseisms, spectral images of media

## 1. Постановка задачи изучения микросейсмического фона сейсмограмм МОГТ

Микросейсмические поля в отличие от зеркальных отражений сигналов от искусственных импульсных или вибрационных источников имеют естественную природу происхождения и по этой причине характеризуются специфическими свойствами, характерными для шумовых полей. Таковыми являются непрерывный во времени характер микросейсмического поля, его повсеместное присутствие, широкий диапазон непрерывного спектра (от нуля до десятков герц), низкий энергетический уровень сигналов ( $10^{-6}$ – $10^{-3}$  усл. ед.) [1] и неизвестное в общем случае местоположение источника. Последнее обстоятельство связано, в частности, с вопросом не только об азимуте распространения микросейсмических возмущений среды от источника к приемнику, но и о направлении подхода к пункту наблюдения: по вертикали снизу вверх (от внутренних источников в недрах) или сверху вниз (от внешних космических, атмосферных и техногенных источников). Все это делает принципиально невозможным применение к сейсмограммам микросейсм аппарата обработки сейсмограмм объемных волн, глубоко развитого в современных технологиях МОВ ОГТ и направленного в конечном итоге на получение волнового изображения исследуемой среды, ее скоростных и динамических характеристик. Вся

обработка импульсных сейсмических сигналов проводится в пространственно-временной области сейсмограммы  $S(x,t)$ , по которой определяются времена прихода волн от источника, вычисляются скорости ( $V$ ), глубина ( $H$ ) и другие параметры среды. Эти данные отображаются в виде временного  $R(x,t)$  или глубинного  $G(x,H)$  сейсмических разрезов.

Принципиально новое направление в сейсмологии заключается в перенесении процедур обработки микросейсмических полей из пространственно-временной  $S(x,t)$  в пространственно-спектральную  $W(x,f)$  область с целью получения спектрального изображения среды  $A(x,f)$ .

Имеются примеры успешного использования волн Релея для получения «спектральных изображений» (СИ) среды, основанных, так же как и в сейсмотомографии, на дисперсионных свойствах волны Релея [2]. Основные моды этой волны существуют в широком диапазоне частот от высоких (более 1,0 Гц) у поверхности среды, до низких (менее 1,0 Гц) на глубине. Таким образом, волна Релея, распространяясь вдоль поверхности Земли от области возникновения, например, в Мировом океане, вовлекает в волновое движение земную кору до глубины ( $H$ ), пропорциональной длине волны ( $\lambda$ ), в соответствии с соотношением  $H = \lambda = V_R/f$ , где  $V_R$  – скорость волны Релея,  $f$  – частота. Поэтому для увеличения глубины исследования измерения микросейсм выполняют на частотах ниже одного герца. Затем сейсмические записи микросейсм по линии или на площади наблюдения преобразуются в спектры Фурье, которые

отображаются в плоскости разреза или в объеме среды. Информативной составляющей здесь являются значения плотности спектральной мощности микросейсмического поля.

Указанные методы требуют проведения полевых наблюдений микросейсмических полей со специализированной низкочастотной аппаратурой. В то же время на сейсмограммах, полученных в результате выполненных на территории России разведочных или научно-исследовательских работ МОГТ, КМПВ, ГСЗ и др., содержатся сотни миллионов первичных записей микросейсм от момента возбуждения до прихода первых вступлений. Возможность использования этих записей с целью извлечения полезных геофизических и дополнительных к сейсморазведке данных требует выяснения вопроса об информативном содержании этих микросейсмических полей, а также разработки методики извлечения этой информации. Впервые эти подходы были предложены и опробованы на материалах сейсморазведки в нефтеносном районе [3], а также на акватории шельфа Обской губы [4].

## 2. Особенности микросейсмических сигналов на сейсмограммах МОВ ОГТ

С целью изучения особенностей микросейсмических полей нами использовались первичные сейсмограммы МОГТ (виброисточник) по геотраверсу «Уралсейс» протяженностью в 500 км, предоставленные специалистами ВСЕГЕИ.

Методика обработки профиля Уралсейс состояла в продольном профилировании МОВ ОГТ. Использовалась телеметрическая станция INPUT/OUTPUT-2, 360 активных каналов; расстояние между центрами групп сейсмоприемников СМ-4 (10 Гц) – 50 м, расстояние между ПВ – 150 м; кратность перекрытия ОГТ – 90–36, средняя кратность – 60; длина рабочей расстановки СП – 18 000 м; максимальное расстояние ПВ – ПП – 9000 м.

Для дальнейшей обработки формировался массив сейсмограмм по общим точкам приема (ОПП) вдоль профиля с интервалом в 2,5 км. Выборка составила 200 ОПП на 500 км по профилю. С учетом кратности системы наблюдения и количества воздействий вибраторов на каждой точке приема получалось от 360 до 900 трасс записей сейсмического процесса (в среднем – 600 трасс) длительностью во времени 25 с. Таким образом, массив исходных данных, подвергнутых дальней-

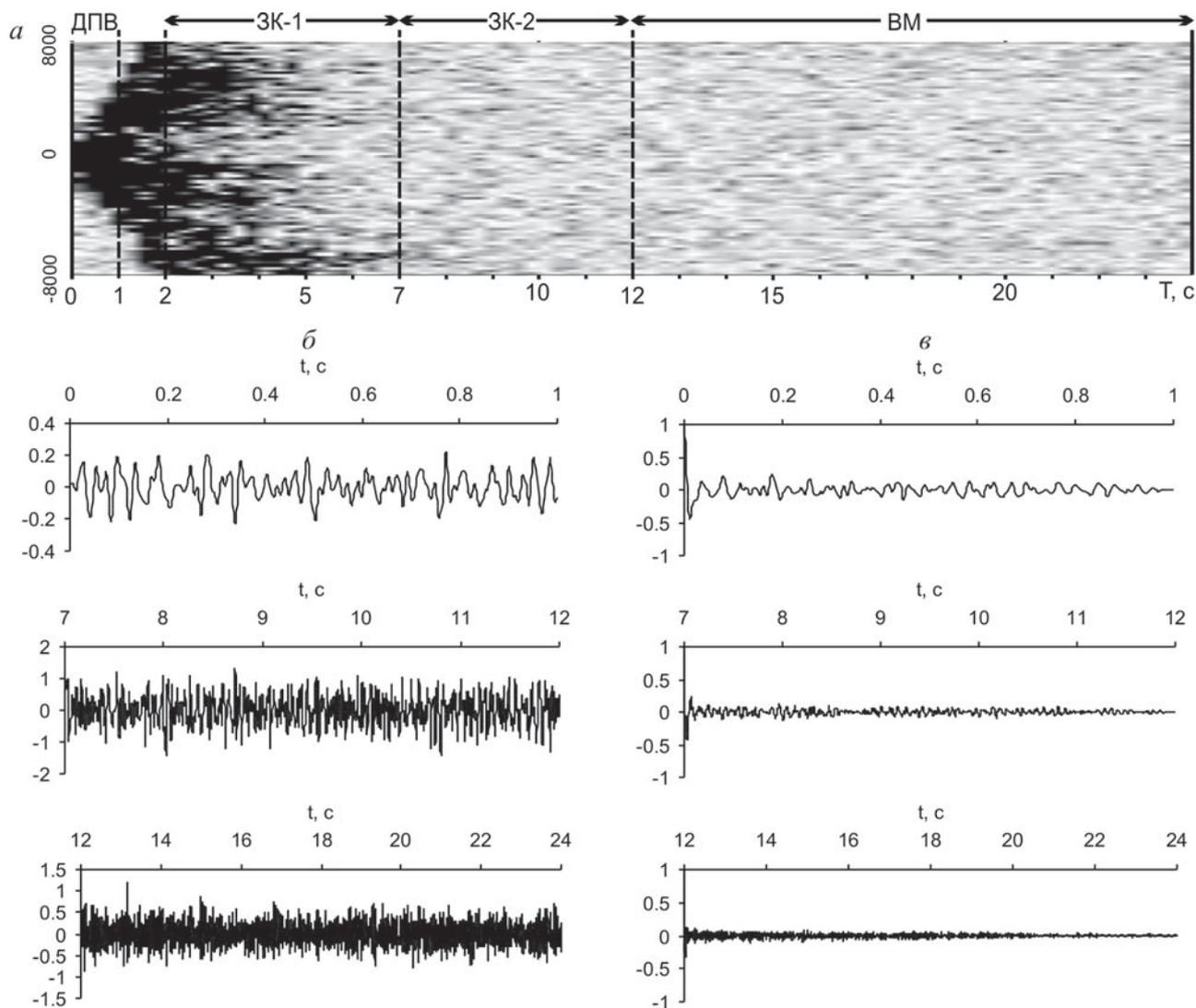
шей обработке, составил 120 000 трасс первичных записей.

Первоочередной задачей являлось автоматическое выделение микросейсмической составляющей из волнового поля сейсмограмм ОПП.

Возрастающие временные интервалы от нулевого момента записей волнового поля на типичных для профиля «Уралсейс» сейсмограммах условно обозначались следующим образом: (0–1 с) – до первых вступлений (ДПВ); (2–7 с) – отражения от верхней части земной коры (ЗК-1) и (7–12 с) – отражения от нижней части земной коры (ЗК-2); (12–24 с) – волны от зоны ниже границы Мохоровичича из верхней мантии (ВМ) (рис. 1, а). Отметим, что отраженные волны от неоднородностей в земной коре на первичных сейсмограммах проявляются в виде слабых или даже незаметных на волновом фоне сигналов и могут быть выявлены только после применения процедур многократного суммирования в соответствии с методиками МОВ ОГТ.

В каждом из указанных интервалов применялся специально разработанный алгоритм кластерного анализа, выбирающий из совокупности сейсмограмм ОПП записи, в которых уровень сигналов не превышал средний по интервалу. В результате из ОПП исключались трассы записей, содержащие более интенсивные сигналы отраженных волн, и оставались в основном сигналы микросейсмического фона (рис. 1, б). Общий характер волновых форм записей и их автокорреляционных функций (АКФ) вдоль отобранных трасс ОПП указывают на квазистационарный шумовой характер волнового процесса. Общий уровень АКФ не превышает значений 0,1–0,22 при отсутствии ярко выраженных экстремальных значений (рис. 1, в).

Для изучения распределения вдоль профиля средних значений амплитуд микросейсмического фона по отобранным на первом этапе сейсмограммам ОПВ строились графики  $A_{\phi}(x)$  во всех временных диапазонах: ДПВ, ЗК-1, ЗК-2, ВМ, а также в пределах времени регистрации всей сейсмограммы (0–24 с). Полученные графики выявляют существенно неравномерный характер проявления энергии микросейсмических процессов вдоль профиля «Уралсейс» (рис. 2). Из приведенной иллюстрации следует, что средние амплитуды микросейсм ДПВ (0–1 с), наблюдаемых в «чистом виде», на порядок меньше, чем сигналы на больших временах прихода из сейсмически «прозрачной» верхней мантии ВМ (12–24 с). Средние ам-



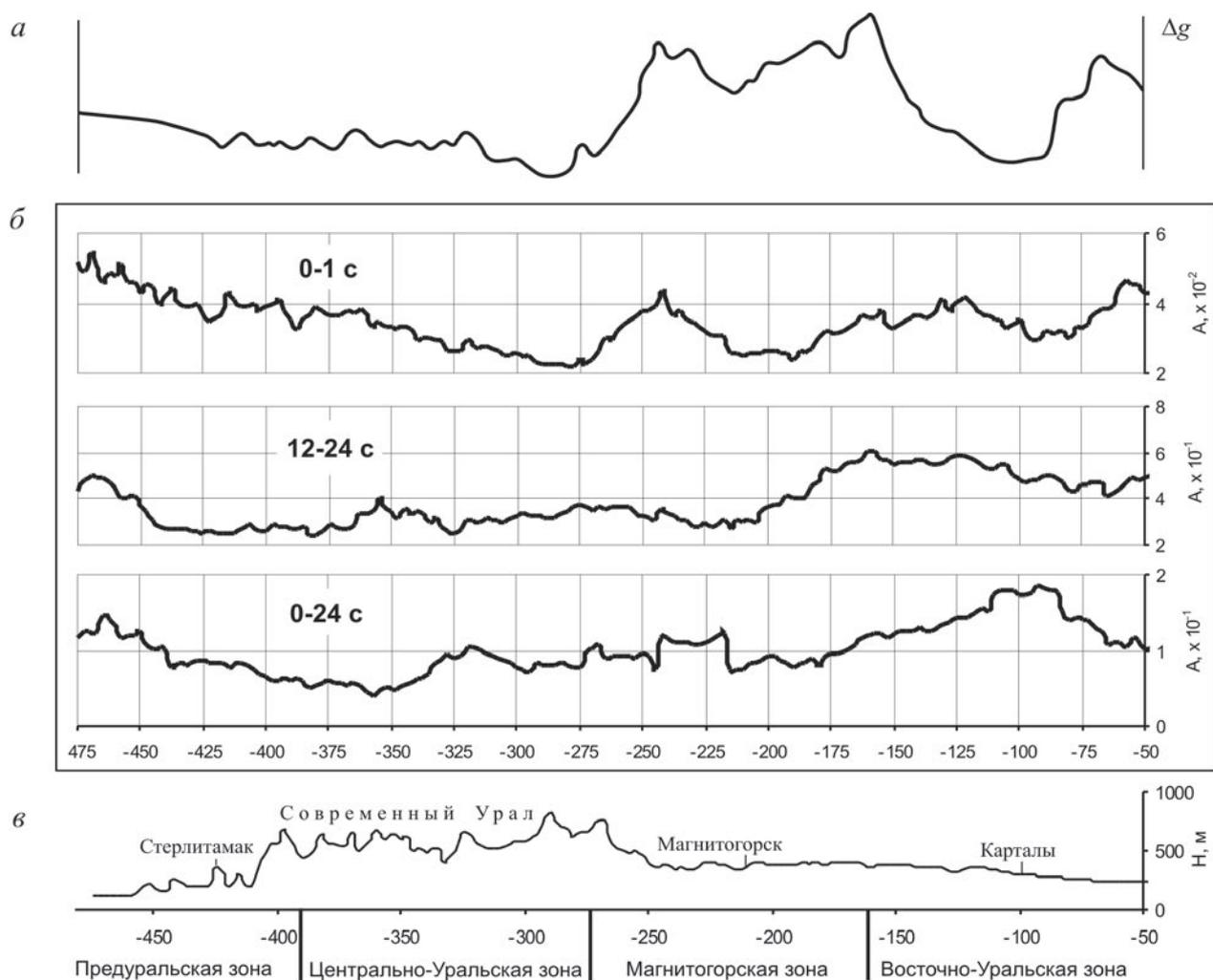
**Рис. 1.** Пример записей микросейсмического фона в общем пункте приема (ОПП) на геотраверсе «Уралсейс»: а – первичная сейсмограмма ОПП; б – фрагменты записей в трех временных интервалах; в – функции автокорреляции

плитуды выделенного микросейсмического фона, содержащегося во всей сейсмограмме (0–24 с), изменяются в пределах 0,2–2,0 усл. ед. Важно отметить, что графики  $A_{\phi}(x)$  имеют совпадающие тенденции изменения вдоль профиля. Это свидетельствует о единой природе микросейсмического волнового поля, записанного в любом временном диапазоне сейсмограммы, в том числе до первых вступлений, где еще отсутствуют сигналы излучения удаленного от ОПП виброисточника. Различия в графиках амплитуд микросейсм объясняются за счет остаточного влияния отраженных, дифрагированных и рассеянных волн, возбужденных в среде виброисточником.

С целью получения общих представлений о влиянии сложного рельефа на энергетику мик-

росейсмического фона и ее возможной связи с полем тяжести и региональными геоструктурными объектами проводилось сравнение графиков распределения амплитуд микросейсм вдоль геотраверса «Уралсейс», пересекающего известные геоструктурные зоны с запада на восток: Предуральскую, Центрально-Уральскую, Магнитогорскую, Восточно-Уральскую и Зауральскую, – с графиком аномалий силы тяжести  $\Delta g(x)$  и рельефом дневной поверхности. (Все иллюстративные материалы геолого-геофизических исследований по геотраверсу «Уралсейс» здесь и далее приводятся из монографии [5]).

Магнитогорская геоструктурная зона ярко проявляется в гравитационном поле в виде региональной положительной аномалии, ограниченной



**Рис. 2.** Сравнение характеристик сигналов микросейсм с полем тяжести и рельефом: а – график поля силы тяжести  $\Delta g$ ; б – средние по ОПП графики амплитуд микросейсм в трех интервалах записи; в – рельеф дневной поверхности и распределение основных геоструктурных зон по профилю

с востока и запада обширными локальными минимумами (рис. 2, а). Этим минимумам в какой-то степени соответствуют локальные понижения уровня амплитуд микросейсм, особенно заметные на графике микросейсм ДПВ (0–1 с), в районе пикетов –300 и –100.

Простое сопоставление формы амплитудных графиков микросейсм с рельефом дневной поверхности вдоль профиля «Уралсейс» не обнаруживает явно заметных связей даже при пересечении профилем горных областей Уральского хребта, где абсолютные отметки достигают 1100 м, а разница высот между предгорьями и горами составляет порядка 500 и более метров [5]. Этот результат в определенной степени противоречит интуитивным ожиданиям обнаружить существенную разницу в уровне микросейсм в горных районах и на равнинах (рис. 2, в). Объяснение возможно

за счет избирательной чувствительности спектра микросейсм к перепадам высот рельефа, которая проявляется наилучшим образом на определенных частотах и не может быть явно обнаружена в рабочем диапазоне частот сейсмоприемников СМ-4 (10–45 Гц).

Имеются примеры обнаружения закономерной зависимости среднего энергетического уровня микросейсмического шума от геологического строения и геофизических свойств крупных геоструктурных блоков [6]. Однако частотно-энергетические связи параметров микросейсм с геоморфологией остаются практически не изученными.

Сравнение графиков  $A_{\phi}(x)$  и поля тяжести  $\Delta g(x)$  показывает, что в рассматриваемом диапазоне частот (выше 10 Гц) энергия микросейсмического поля значительно более чувствительна к локальным неоднородностям геологической среды. В то

же время некоторая взаимосвязь рассматриваемых полей прослеживается при сравнении сильно сглаженного графика  $A_{\phi}(x)$ , выявляющего региональный тренд энергии микросейсм на протяжении 500 км профиля «Уралсейс». Связь поля тяжести с микросейсмическими полями, например, может проявиться по известной причине относительного уменьшения амплитуды упругих волн в акустически жестких (более плотных) средах.

### 3. Основные особенности спектров микросейсмических сигналов сейсмограмм МОВ ОГТ на профиле «Уралсейс»

Отобранные сейсмограммы ОПП преобразовывались в спектры Фурье, из которых синтезировались спектральные изображения (СИ) профиля «Уралсейс». Для исключения различий в условиях установки приемников на местности и временных вариаций микросейсмического фона при производстве наблюдений вдоль профиля спектры сейсмограмм, отобранных на первом этапе обработки, на каждом ОПП нормировались к своему среднему значению и логарифмировались. Проводились операции сглаживания значений спектральных составляющих вдоль профиля на базе 25 км и по оси частот в окне 0,5 Гц. Значения амплитуд спектров микросейсм отображались цветом в плоскости координат:  $x$  – горизонтальное расстояние по профилю,  $f$  – частота по вертикали со понижением значений с «глубиной» от 45 до 10 Гц.

На рис. 3 показаны спектральные изображения профиля, построенные по указанным выше интервалам сейсмограмм (рис. 3, а, б, в, г) и во всем временном диапазоне 0–24 с (рис. 3, д). В связи с потерей наглядности цветного изображения при черно-белом воспроизведении, светлыми линиями на рисунке подчеркнуты некоторые границы спектральных зон.

Отмечаются две главные характерные особенности СИ: схожесть всех изображений по основным элементам (рис. 3, а, б, в, г, д) и каждого из них со структурой сейсмического разреза МОВ ОГТ профиля «Уралсейс» (рис. 3, е).

Первое обстоятельство подтверждает ранее сделанный вывод о единой природе микросейсмических волн, записанных на сейсмограммах МОВ ОГТ, как до, так и после первых вступлений, в том числе на временах, превышающих информативный интервал регистрации отражений, образованных в толще земной коры.

Сравнение СИ с результатами одного из вариантов предварительной интерпретации сейсмического разреза [7; 8] обнаруживает неслучайное

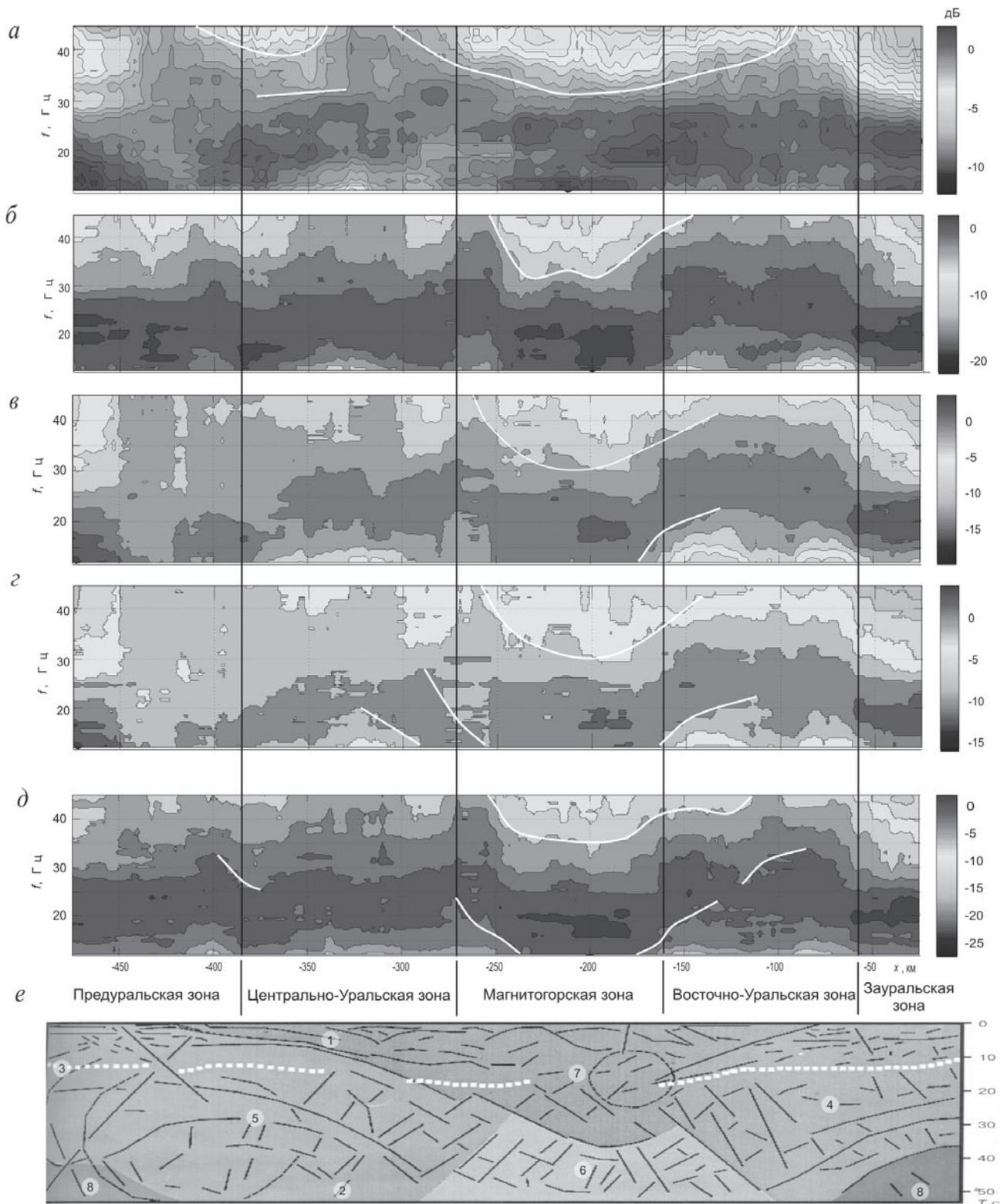
совпадение их структурных планов в плоскости разреза. Например, Магнитогорская зона в центральной части профиля, куда с востока и запада погружаются отражающие границы в земной коре, ясно проявляется зоной резкого понижения значенной спектральной энергии. Граница Мохоровичича здесь размыта и волновое поле на сейсмическом разрезе МОВ ОГТ имеет особенно сложную структуру (рис. 3, е, 4, е). На рассматриваемых СИ вдоль профиля четко проявляется региональная геотектоническая зональность к востоку и западу от Магнитогорской зоны. Распределение спектральной энергии микросейсм по шкале частот оказывается различным в пределах известных геоструктурных зон и на СИ представлено в виде блоков с вертикальными или наклонными контактами, горизонтальными или сложными границами раздела спектральной мощности в плоскости изображения.

Спектральное изображение разреза, полученное по сейсмограммам микросейсм ДПВ (рис. 3, а) по сравнению с другими СИ из разных временных интервалов исходных сейсмограмм МОГТ имеет наибольшее сходство с СИ из сейсмически прозрачной верхней мантии (рис. 3, г), но менее резко дифференцировано по профилю.

«Похожесть» спектральных изображений, полученных в любом сечении времени сейсмограмм МОГТ, из которых практически исключены вторичные волны, возбужденные источником, подтверждает сделанный выше вывод о присутствии в среде независимого от вибрационного источника микросейсмического поля.

Если поле упругих волн взаимодействует с неоднородностями среды непрерывно во времени и пространстве и обладает широким спектром частот, то информация об этой среде содержится в любой точке измерения в любое время. Это следует из теории и практики оптической голографии в некогерентных полях [9]. Сейсмограмма микросейсмического поля является аналогом голограммы интенсивности и в отличие от оптического варианта содержит еще и полную фазовую информацию, что, в принципе, значительно расширяет возможности отображения свойств среды и ее неоднородностей.

Согласно принятой методике МОГТ вибрационный источник воздействовал на среду в течение 30 с при времени регистрации 55 с. Для получения сейсмограмм в импульсной форме проводилась корреляция первичных виброграмм со свип-сигналом вибратора. Для исключения возмож-



**Рис. 3.** Сравнение спектральных изображений микросейсм с результатом интерпретации сейсмического разреза профиля «Уралсейс» [8]. Спектральные изображения из интервалов записей: а – до первых вступлений ДПВ; б – (2–7) с; в – (7–12) с; г – (12–24) с; д – по всей сейсмограмме (0–24) с; е – сейсмический разрез по профилю: 1 – контрастные сейсмические границы; 2 – предполагаемые тектонические нарушения; 3 – граница Мохоровичича (пунктир); 4 – Западно-Сибирская плита; 5 – Восточно-Европейская плита; 6 – межплитовая область; 7 – тектонический покров; 8 – мантия

ного присутствия регулярного фона вибратора в спектрах сейсмограмм проводилась операция нормирования спектров во всех пунктах приема к среднему спектру по всему профилю. В результате на спектральных изображениях видны только аномальные области, отличающиеся от среднего по профилю на данной частоте.

Полученные спектральные изображения представлены на рис. 4 в сравнении с результатами геофизических работ [10]. СИ аномалий спектров выявили блочное распределение спектральной энергии в плоскости разреза при сохранении общей картины с предыдущим результатом (рис. 3). Четкие границы спектральных аномалий практически повсеместно совпадают с границами геоструктурных зон или маркируют известные тектонические нарушения, например, Главный Уральский разлом (ГУР) в районе ПК –250... –270, Карталинский разлом (ПК –100... –90) и другие в западной половине профиля (рис. 4, е). Отметим, что аномальные спектральные зоны четко коррелируют с разрезами квазижесткости и локального квазипоглощения по результатам дифференциальной сейсморазведки [10].

Подробное изучение связи деталей спектральных изображений с результатами геолого-геофизических работ на геотраверсе «Уралсейс» представляет обширную самостоятельную задачу дальнейшего изучения.

#### 4. Обсуждение результатов и выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать ряд предварительных выводов.

1. Сопоставление полученных спектральных изображений профиля «Уралсейс» с результатами геофизических работ показало, что микросейсм на сейсмограммах МОВ ОГТ с виброисточником во всем времени записи (0–24 с) и диапазоне частот 10–40 Гц содержат информацию о геологической среде земной коры до глубины порядка границы Мохоровичича (40–45 км). Этот факт не позволяет отнести исследованные микросейсмические поля к поверхностным волнам релеевского типа, которые на указанных частотах способны осветить глубины не более 0,4 км. Аналогичный эффект отмечался нами на шельфе Обской губы [4], где высокочастотные спектральные изображения ДПВ показывали детали сейсмического разреза МОГТ до глубины более 12 км.

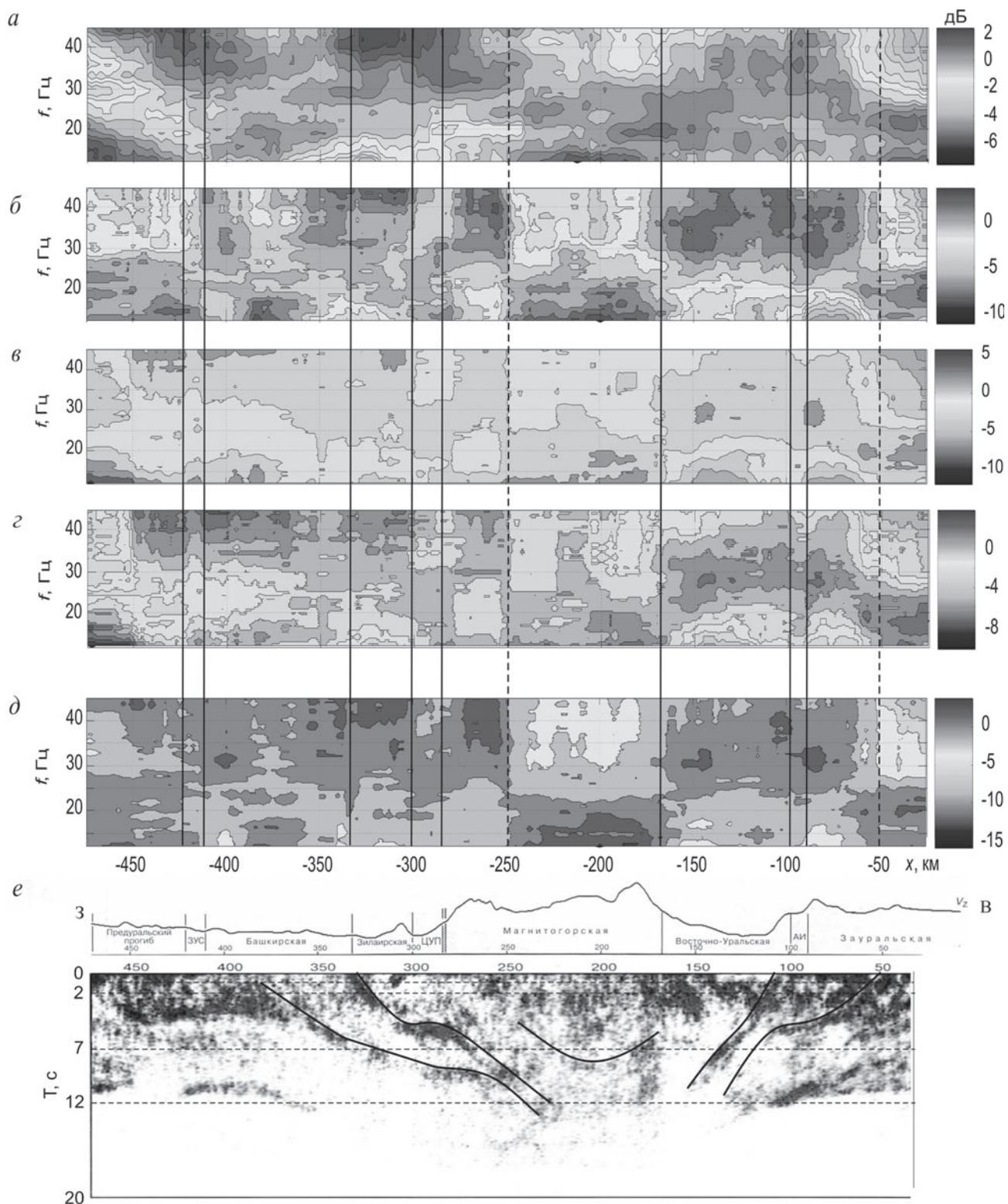
2. Спектральные изображения наполняют сейсмический разрез МОГТ новым содержанием о динамических свойствах исследуемой сре-

ды, которые могут быть использованы с целями картирования геологических объектов в плане и разрезе, уточнения контактов геоструктурных зон и разломов, определения контрастности упругих свойств блоков пород и степени их геодинамической активности. Решение этих задач возможно при дальнейшей разработке теории и методики комплексной интерпретации микросейсмических спектральных изображений геологической среды.

3. Использование микросейсмической составляющей, содержащейся в сейсмограммах по уже отработанным профилям, имеет реальную перспективу стать эффективным средством дополнения и совершенствования методов геофизической разведки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Хаврошкин О. Б.* Некоторые проблемы нелинейной сейсмологии / О. Б. Хаврошкин. – М. : ОИФЗ РАН, 1999. – 286 с.
2. *Горбатилов А. В.* Возможность оценки параметров геологических объектов на основе использования фонового микросейсмического поля / А. В. Горбатилов // Результаты экспериментальных исследований и моделирование: международная сейсмологическая школа. – Петергоф, 2006. – С. 66–71.
3. *Ведерников Г. В.* Изучение геодинамических шумов от нефтегазоносных залежей по участкам сейсмограмм МОГТ (2D и 3D) без проведения специальных наблюдений / Г. В. Ведерников // Геофизика. – 2006. – № 5.
4. *Дубянский В. И.* Предварительные результаты изучения информативного содержания микросейсмических шумов сейсмограмм МОВ ОГТ, полученных в условиях мелководного шельфа (Обская губа) / В. И. Дубянский, Ю. В. Рослов, К. Ю. Силкин // Вестник ВГУ. Серия: Геология. – 2009. – № 2. – С. 134–140.
5. Глубинное строение и геодинамика Южного Урала : монография «Проект Уралсейс». – Тверь : Изд-во ГЕРС, 2001. – С. 92–101.
6. *Надежка Л. И.* О связи параметров сейсмического шума с геологическими и геодинамическими особенностями Воронежского кристаллического массива / Л. И. Надежка [и др.] // Вестник ВГУ. Серия: Геология. – 2003. – № 2. – С. 179–185.
7. *Гильберштейн П. Г.* Развитие методики интерпретации в глубинной сейсморазведке МОГТ / П. Г. Гильберштейн, С. А. Каплан, А. С. Козлов // Глубинное строение и геодинамика Южного Урала (проект «Уралсейс»). – Тверь : Изд-во ГЕРС, 2001. – С. 92–101.
8. *Горный В. И.* Модель мантийно-литосферного взаимодействия по данным комплексирования на геотраверсе «Уралсейс» сейсморазведки и дистанционного геотермического метода / В. И. Горный [и др.] // Глубинное строение и геодинамика Южного Урала (проект «Уралсейс»). – Тверь : Изд-во ГЕРС, 2001. – С. 227–238.



**Рис. 4.** Сравнение спектральных аномалий микросейсм с данными геофизики по профилю «Уралсейс». Спектральные изображения из интервалов записей: а – ДПВ; б – 2–7 с; в – 7–12 с; г – 12–24 с; д – по всей сейсмограмме 0–24 с; е – график  $V_z$  с названиями геоструктурных зон; ж – комбинированный разрез МОВ-вибро по [5]

9. Сороко Л. М. Основы голографии и когерентной оптики / Л. М. Сороко. – М. : Наука, 1971. – 616 с.

10. Ступак В. М. Структурные, кинематические и динамические характеристики Южного Урала по дан-

ным дифференциальной сейсморазведки / В. М. Ступак, Р. Г. Берзин // Глубинное строение и геодинамика Южного Урала (проект «Уралсейс»). – Тверь : Изд-во ГЕРС, 2001. – С. 43–51.

*Воронежский государственный университет*

*В. И. Дубянский, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей геологии и геодинамики*

*vdb20062@yandex.ru*

*Тел. 8 (473) 220-86-82*

*Voronezh State University*

*V. I. Dubyanskiy, Candidate of Physical and Mathematical Science, Associate professor of Geology and Geodynamic Chair*

*vdb20062@yandex.ru*

*Tel. 8 (473) 220-86-82*

*К. Ю. Силкин, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры экологической геологии*

*const@geol.vsu.ru*

*Тел. 8 (473) 220-83-85*

*C. Y. Silkin, Candidate of Geology and Mineralogy Science, Associate professor of Chair of Econlogycal Geology*

*const@geol.vsu.ru*

*Tel. 8 (473) 220-83-85*