На правах рукописи

Орлов Радомир Аполлонович

Использование микросейсмического шума для решения геологических задач в условиях платформы (на примере Воронежского кристаллического массива)

Специальность 25.00.10 – геофизика,
геофизические методы поисков полезных ископаемых

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

Екатеринбург –2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Геофизической службе РАН

Научный руководитель: член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, директор ГС РАН
Маловичко А. А.

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук, профессор **Шаров Н.В.**

доктор геолого-минералогических наук
Виноградов А.М.

Ведущая организация: Воронежский государственный университет (г. Воронеж)

Защита состоится 22 апреля 2011 года в 10 час. на заседании диссертационного совета Д 004.009.01. в Учреждении Российской академии наук Институте геофизики УрО РАН по адресу: 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института геофизики УрО РАН.

Автореферат разослан « __ »_____ 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор Хачай Ю.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Изучение микросейсмического шума (МСШ) является в настоящее время актуальной задачей, как в теоретическом, так и в практическом плане. Во-первых, МСШ содержат важную информацию о современном состоянии Земли и в целом о «жизни» нашей планеты, ее реакции на космические воздействия и влияние развивающейся ноосферы. Во-вторых, микросейсмические шумы отражают неоднородное геологическое строение и напряженное состояние верхней части земной коры. Изучению этого свойства МСШ уделяется большое внимание, как в нашей стране, так и за рубежом *(Николаев, 1965, 1968, 1973; Капустян, Юдахин, 2004, 2007, 2008; Горбатиков,1993, 2005, 2008; Shapiro, 2005 и др.).* Имеется целый ряд примеров решения с помощью МСШ задач микросейсмического районирования территорий, картирования геологических структур, выделения на глубине аномальных объектов *(Антоненко, 1962).*

Однако, все положительные решения сложных геологических задач на основе изучения характеристик микросейсмического шума, являются результатом единичных опытных работ в разнообразных геологических регионах. Можно констатировать, что в настоящее время идет становление нового, чрезвычайно перспективного направления геофизических исследований, которое определяют как сейсмическая шумовая томография или сейсмология микромасштаба *(Рыкунов, 1996).*

Немаловажным фактором является и экономическая составляющая методики исследования, так как она не связана с применением дорогостоящих искусственных источников возбуждения колебаний. Поэтому разработка малозатратного метода картирования геологических структур является актуальной.

С учетом сказанного, очевидна необходимость выяснения возможностей решения разноплановых геологических задач на основе анализа микросейсмического шума в платформенных условиях. Учитывая хорошую изученность Воронежского кристаллического массива геологическими и геофизическими методами, он может быть использован в качестве базового объекта для разработки методики использования МСШ при решении геологических задач различного масштаба и сложности.

Цель работы. Оценка эффективности практического использования микросейсмического шума для решения геологических и геодинамических задач в условиях платформы на примере Воронежского кристаллического массива (ВКМ).

Реализация поставленной цели предусматривает решение следующих задач:

- обобщение опыта использования характеристик микросейсмического шума для решения геологических задач;
- изучение особенностей микросейсмического шума и его временных вариаций в условиях платформы;
- разработка методики полевых измерений и обработки МСШ при решении геологических задач в условиях платформы;

- оценка эффективности использования микросейсмического шума на ВКМ при решении конкретных геологических задач.

Практическая ценность и реализация работы.

Результаты исследований открывают перспективу практического применения малозатратного метода, основанного на анализе МСШ, для изучения геологического строения осадочного чехла и кристаллического фундамента платформенных территорий, поиска локальных структур (например, трубок взрыва). Разработаны практические рекомендации по применению метода для решения конкретных геологических задач.

Научная новизна работы.

Получены новые данные о спектральных характеристиках МСШ и его временных вариациях в диапазоне частот 0.1-10 Гц. Выявлены связи информативных параметров МСШ с геологическими неоднородностями.

Разработана методика полевых измерений и обработки данных МСШ при решении широкого спектра геологических задач в условиях платформы. Показано, что наиболее информативным для решения ряда геологических задач и устойчивым к временным вариациям является частотный диапазон спектра МСШ 0.7-1.4 Гц.

Доказана возможность использования особенностей МСШ для выделения крупных блоков кристаллического фундамента и неотектонических структур.

Проведены измерения МСШ на локальных объектах различных по своей геологической природе и геодинамической позиции, в том числе на уникальной структуре – погребенном Курском метеоритном кратере. Показана возможность изучения локальных структур, как в плане, так и в разрезе, существенно дополняя информацию других геофизических методов.

Обоснованность результатов - определяется использованием калиброванной аппаратуры, подтверждается статистическим анализом и повторяемостью результатов, полученных в разное время. Интерпретация измерений МСШ опирается на результаты геофизических и буровых работ, другие геологические материалы (карты, разрезы, петрофизические свойства).

Защищаемые положения.

1. Исследована структура и свойства микросейсмического шума на Воронежском кристаллическом массиве и показано что, микросейсмический шум содержит обширную информацию о структурно-геологических неоднородностях и напряженном состоянии литосферы различных иерархических уровней. Это позволяет рассматривать его как постоянно действующий элемент сейсмического поля, несущий информацию не только о литологическом составе, но и геодинамическом состоянии геологической среды.

2. Установлена связь параметров микросейсмического шума (уровень шума, отношение амплитуд горизонтальной и вертикальной составляющих в диапазоне частот 0.7-1.4 Гц) с латеральными геологическими неоднородностями и новейшей тектонической структурой крупных блоков ВКМ как на уровне неоген-

четвертичного структурно-вещественного комплекса осадочного чехла, так и кристаллического фундамента.

3. Показана эффективность использования микросейсмического шума при детальном изучении геологического разреза и картирования локальных геологических структур.

Апробация. Основные результаты исследований доложены на всероссийских и международных конференциях: на одиннадцатой международной научной конференции «Строение, геодинамика и минерагенические процессы в литосфере» в Сыктывкаре (2005г.), на Казахстано-российской международной конференции «Геодинамические, сейсмологические и геофизические основы прогноза землетрясений и оценки сейсмического риска» в Алматы (2005 г), на XII международной конференции «Активные геологические и геофизические процессы в литосфере. Методы, средства и результаты изучения» в Воронеже (2006г), на международной геологической конференции «Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов» в Казани (2007г), на XV всероссийской конференции «Геологические опасности» в Архангельске (2009г), на XVI международной конференции «Свойства, структура, динамика и минерагения литосферы Восточно-Европейской платформы» в Воронеже (2010).

Результаты исследований обсуждались на семинарах и ежегодных отчетных научных конференциях геологического факультета Воронежского государственного университете, на научно-практических конференциях Воронежского государственного технического университета (2005-2010) и на ученых советах Геофизической службы РАН.

Работа выполнена под руководством член-корр. РАН А.А. Маловичко, которому автор выражает глубокую признательность. Автор искренно благодарит к.ф.-м. н., зав. лабораторией СМ ВКМ Л.И. Надежку, которая определила основное направление проведенных исследований и в процессе работы дала большое количество ценных советов. Автор глубоко благодарен за консультации, советы и замечания, сделанные д.г.-м.н. Ю.К. Щукиным и д.г.-м.н. В.И. Макаровым, за чуткое внимание и поддержку сотрудников ВГУ член.-корр. РАН Н.М. Чернышову, д.г.-м.н. А.И. Трегубу и к.г.-м.н И.П. Лебедеву. Глубокую признательность автор выражает своим коллегам И.Н. Сафроничу, М.А. Ефременко, И.А. Сизаску за большую практическую помощь в работе. Большое спасибо за моральную поддержку моей жене.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 23 публикации, из них 3 статьи в рецензируемых отечественных изданиях.

Структура работы: диссертация состоит из введения, 4 глав основной части и заключения. Объем работы 143 страницы, 32 рисунка, 2 таблицы. Список использованных источников включает 122 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе I «Современное состояние исследований микросейсмических шумов» дан обзор современного состояния проблемы использования микросейсмического шума для решения геологических задач, рассмотрена природа микросейсмических шумов (МСШ) и их источников, проведены примеры практического использования МСШ.

Естественные МСШ являются объектом изучения экспериментальной и теоретической сейсмологии, начиная с момента их открытия в конце XIX века. Они присутствуют как на поверхности Земли, так и во внутренних точках среды и проявляются в широком диапазоне частот, а их амплитуды варьируют в интервале от десятков нанометров до сотен микрометров.

Начало изучению микросейсм, как объекта сложной природы, положил в начале XX века Б.Б. Голицын. Большой вклад в изучение низкочастотных микросейсм сделан Рыкуновым (1967, 1978, 1982, 1996г), Винником (1968), Монаховым (1977), В.Н. Табулевич (1986), О.Б. Хаврошкиным (1999, 2000), которые сформировали представления о механизмах излучения микросейсм, дали объяснение основных их особенностей. Установлено, что высокочастотные (более 1.0 Гц) сейсмические шумы (ВСШ) в значительной степени связаны с работой промышленных предприятий и транспорта и по этой причине иногда называются сейсмическими помехами. В последние десятилетия исследователями отмечен феномен глобального подъема уровня микросейсмического шума на континенте *(Капустян, 2004).* Для исследования пространственно-временных и частотных характеристик техногенных МСШ привлекаются методы численного моделирования *(Маловичко, 2002).*

В последние годы получены данные по регистрации ВСШ на Камчатке и Сахалине. Суточные хода ВСШ при измерениях в скважине на глубине 1035 м в определенные периоды времени совпадают с суточным ходом естественного электромагнитного поля *(Гуфельд, 2008).* Изменчивость сигналов геоакустической и электромагнитной эмиссии отмечается в Кольской СГ-3 и других сверхглубоких скважинах, в вариациях амплитудного уровня ГАЭ уверенно выделяются суточные и полусуточные периоды *(Троянов, 2005).*

Эти факты свидетельствуют о том, что природа суточных вариаций шума не может быть объяснена только антропогенным фактором. Очевидно, что уровень регионального МСШ в значительной степени зависит от геологических условий в точке измерений, а вариации как от постоянно действующих фоновых полей (например, лунно-солнечные приливы) так и причин эндогенного происхождения.

Сильная амплитудно-частотная зависимость высокочастотных сейсмических шумов от типа грунтов широко используется при сейсмическом районировании; проведено изучение сейсмических свойств грунтов по микроколебаниям на сейсмоопасных территориях Ташкента, Алматы, Бишкека и многих других городских агломераций *(Николаев, 1965).*

Перспективы получения устойчивой и строго обоснованной связи между параметрами микросейсмических шумов и строением земной коры, начиная со времен Б.Б. Голицина, побуждают исследователей проводить соответствующие поисковые работы.

Еще в 80-е годы академиком М.А. Садовским совместно с А.В. Николаевым было высказано предположение, что реальные горные породы обладают выраженными нелинейными упругими свойствами, постоянно излучают микросейсмические колебания (сейсмическая эмиссия), претерпевают временные изменения в связи с изменениями напряженного состояния. Идея состоит в том, что каждый отдельный рассеиватель (геологическая неоднородность) в среде переизлучает микросейсмические колебания. Это вторичное излучение имеет упорядоченную пространственную структуру, которая тесно связана со строением среды (*Садовский, 1982).*

В 2006 г опубликованы работы А.А. Маловичко об оценке нефтеперспективности объектов с использованием микросейсмических съемок, а в 2008 г. им запатентован способ оценки нефтегазоносности пород.

В 90-е годы разработана и применена на практике технология поиска нефтегазоносных залежей АНЧАР *(Арутюнов, 1999).* Новые возможности изучения шумов от нефтегазовых залежей появляются при анализе участков сейсмограмм разведочных работ МОГТ, свободных от записи полезных волн, т.е. без проведения специальных наблюдений *(Ведерников, 2006).*

Одним из перспективных направлений разработки способов качественной и количественной оценки современной тектонической активности локальных участков геологической среды представляется изучение микросейсмичности *(Адушкин, 2002).* Микросейсмические шумы рассматриваются как родственный землетрясениям процесс, но находящийся на более низком масштабном и энергетическом уровне. Наиболее известным примером таких измерений являются исследования, проведенные Н.Шапиро в Калифорнии (2007).

В течение ряда лет проводятся исследования техногенной компоненты микросейсм и изучение возможностей сейсмического мониторинга с ее использованием *(Капустян, Юдахин, 2002, 2008).* Ими предложен инструмент для развития нового направления геофизических исследований. Метод опирается на комплексирование активных просвечиваний искусственными и техногенными источниками и пассивных наблюдений собственного сейсмического излучения среды.

Интересные экспериментальные исследования и моделирование выполнено в ИФЗ А.В. Горбатиковым (1993, 2005, 2008). Глубинные исследования на всех объектах проводились на основе применения нового метода микросейсмического зондировании. Метод основан на том, что неоднородности земной коры определенным образом искажают спектр низкочастотного микросейсмического поля, а именно, на поверхности Земли над высокоскоростными неоднородностями спектральные амплитуды убывают, а над низкоскоростными возрастают. При этом низкочастотное микросейсмическое поле (0.03-1.0 Гц) рассматривается как суперпозиция цугов фундаментальных мод Рэлея с различным частотным заполнением.

Выводы. В целом, несмотря на достигнутые результаты, при решении конкретных геологических задач с использованием МСШ остаются нерешенными ряд вопросов:

- возможность применение МСШ для регионального геологического районирования платформенных территорий;
- выделение современных региональных неотектонических структур и оценка их динамического состояния;
- картирование локальных литологических и структурных неоднородностей в осадочном чехле и кристаллическом фундаменте платформенных территорий;

В главе II «Основные черты геологического и тектонического строения Воронежского кристаллического массива» кратко рассмотрены вопросы структурного положения ВКМ, геологического строения эрозионного среза докембрия и осадочного чехла, приведены сведения о современной неотектонической структуре.

Воронежский кристаллический массив (ВКМ) является одной из крупнейших структур Восточно-Европейской платформы и представляет собой погребенный выступ пород архейского и протерозойского возраста. Это поднятие докембрийского фундамента размером 500 на 1000 км, перекрытого осадочным чехлом мощностью до 500 м и более на крыльях одноименной антеклизы и выходящего на дневную поверхность в сводовой части. Массив имеет прямоугольную форму, вытянутую в юго-восточном направлении, и контролируется системой депрессионных структур (рис. 1).

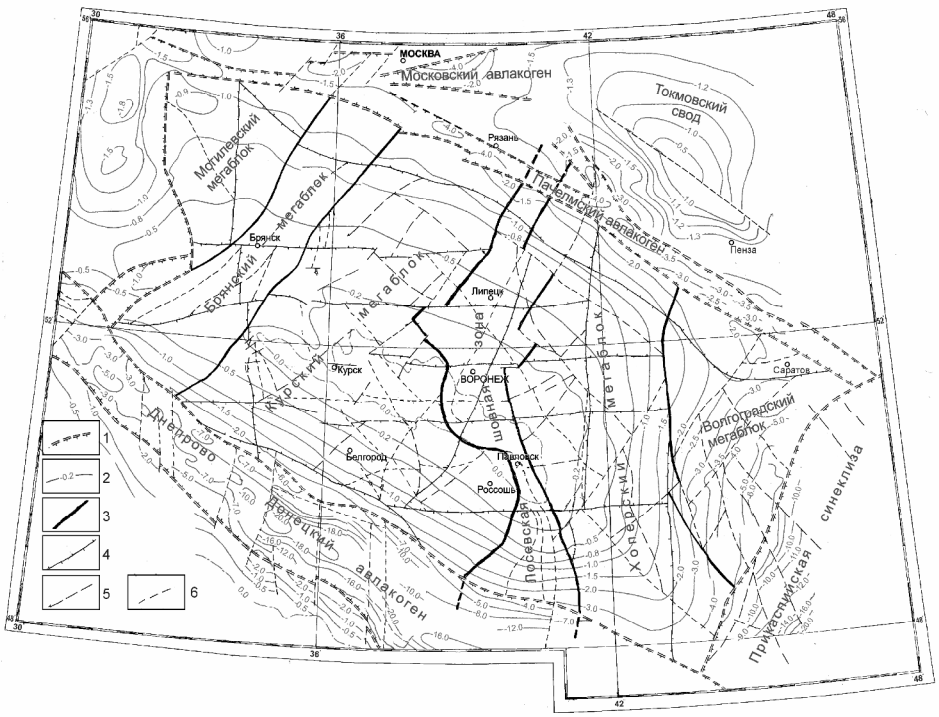

Рис. 1. Схема рельефа фундамента и тектонических нарушений Воронежского кристаллического массива *(В.И. Лосицкий,1999*). 1 – условные границы крупных структур Восточно-Европейской платформы; 2 – изогипсы фундамента; 3 – границы основных структур ВКМ; тектонические нарушения: 4 – первого порядка; 5 – второго порядка; 6 – третьего порядка

В эрозионном срезе докембрия ВКМ современными исследователями в качестве структур первого порядка выделяются: мегаблок Курской магнитной аномалии (КМА), Хоперской мегаблок и разделяющая их Лосевская шовная зона *(Чернышов, 1996, 2002).*

Мегаблок КМА представлен парагенезисом архейских зеленокаменных поясов и гранито-гнейсовых куполов. Он характеризуется широким развитием раннекарельских рифтогенных структур с четко выраженными положительными аномалиями силы тяжести и высокоинтенсивными полосовидными положительными магнитными аномалиями над железистыми кварцитами.

Хоперский мегаблок сложен интенсивно складчатыми, ритмично-слоистыми метаморфизованными породами раннекарельского структурно-вещественного комплекса. Преобладающие породы блока – это отложения воронцовской серии нижнего протерозоя, представленная флишоидным переслаиванием сланцев биотитовых, углеродистых, сульфидсодержащих, песчаников. Хоперский мегаблок насыщен многочисленными интрузиями гранитов, габброидов, и ультрамафитов, с которыми связаны известные медно-никелевые месторождения ВКМ.

Разделяющая мегаблоки Лосевская шовная зона (ЛШЗ), в виде извилисто-меридиональной, S-образной формы полосы, простирается с юга на север на 600 км от Днепрово-Донецкого до Пачелмского авлвкогена. Зоны характеризуется специфическим набором пород осадочно-метаморфических и вулканогенно-интрузивных формаций, широко развиты комплексы интрузивных пород раннего протерозоя.

Лосевская шовная зона отделяется от Хоперского мегаблока крупным региональным глубинным коромантийным Лосевско-Мамоновским разломом (надвигом) 1-го ранга. Западная граница с мегаблоком КМА не имеет четкого выражения. Самым молодым глубинным разрывным нарушением, достоверно установленным по геологическим и геофизическим данным на ВКМ, является Шумилинско-Новохоперский разлом в пределах Хоперского мегаблока. Разлом трассируется протяженной цепочкой магнитных аномалий над телами базальтов девонского возраста.

Стратиграфический перерыв между кристаллическим фундаментом, сформированным к началу верхнего протерозоя, и осадочным чехлом составляет под породами девона 1.2 млрд. лет. Именно в этот промежуток времени поверхность фундамента приобрела свой главный признак – общий равнинный характер. Девонские отложения, широко развитые на площади ВКМ, представлены морскими, лагунными и континентальными фациями. Нижнемеловой структурно-вещественный комплекс (СВК) отделяется от юрского стратиграфическим перерывом и несогласием. Отложения мелового возраста распространены почти на всей площади ВКМ и литологически четко делятся на две части: терригенную и преимущественно карбонатную.

Для неоген-четвертичного СВК, представленного песками, глинами, мореной, на ВКМ выполнено неотектоническое районирование. Наиболее представительными неоген-четвертичными структурами в регионе являются: Среднерус-

ская возвышенность и Окско-Донская впадина. Эти структуры подразделяются на целый ряд блоков второго и более мелкого порядков.

Выводы. Хорошая изученность осадочного чехла (в том числе неоген-четвертичного структурно-вещественного комплекса), а также эрозионного среза докембрия и глубоких горизонтов литосферы, позволяет использовать регион ВКМ в качестве базового объекта для оценки эффективности практического использования микросейсмического шума при решении геологических и геодинамических задач в условиях платформы.

В главе III «Методика полевых измерений и обработки полученных результатов» рассмотрены некоторые характеристики МСШ, изученного на территории ВКМ, приведены сведения об измерительной аппаратуре, рассмотрены основные методические приемы полевых измерений МСШ и алгоритм обработки результатов. Изучение МСШ на ВКМ начиналось с оценки уровня промышленны помех при выборе мест установки новых станций сети сейсмического мониторинга и некоторых особенностей спектра микросейсмических колебаний.

Некоторые особенности микросейсмического шума на ВКМ

Четкое представление об амплитудно-частотных характеристиках микросейсмического шума, его природе и временных вариациях в условиях ВКМ, необходимо для решения главной задачи исследований – изучения связи его статистически значимых параметров с геологическим строением. Спектр микросейсмических колебаний условно можно разделить по частоте на четыре области: I – область длиннопериодных микросейсм с частотой меньше 0.1 Гц – область влияния сильных телесейсмических событий; II область, в которой колебания на частотах от 0.1 до 0.3 Гц часто называются «штормовыми» микросейсмами; III – минимум амплитуды вертикальной компоненты МСШ на частотах 0.7-1.4 Гц, (область спектра, наиболее стабильная при временных вариациях на границе низко- и высокочастотных микросейсмических колебаний); IV – высокочастотная область спектра (1.5-10 Гц), в которой значительный вклад в амплитуду колебаний, наряду с естественными источниками шума, вносят техногенные помехи.

На рис. 2 приведен фрагмент 3-х компонентной волновой записи и их амплитудно-частотные спектры микросейсмического поля, типичного для ВКМ.

Известно, что амплитуда микросейсмических колебаний подвержена значительным временным вариациям. Анализ вклада в вариации интегрального шума (весь спектр колебаний) отдельных частотных диапазонов его позволили сделать вывод о составляющих МСШ наиболее сильно подверженных временным вариациям *(Надежка, Орлов и др., 2004, 2007).*

Из рис. 3 видно, что в диапазоне частот 0.1-0.3 Гц уровень шума подвержен наибольшим изменениям в течение года и даже в летние месяцы на тренде годового цикла зарегистрированы «сейсмические бури». На частотах 1.0-8.0 Гц, где особенно велик вклад в сейсмические колебания антропогенных помех, отмечается спад уровня ВСШ в зимние месяцы.

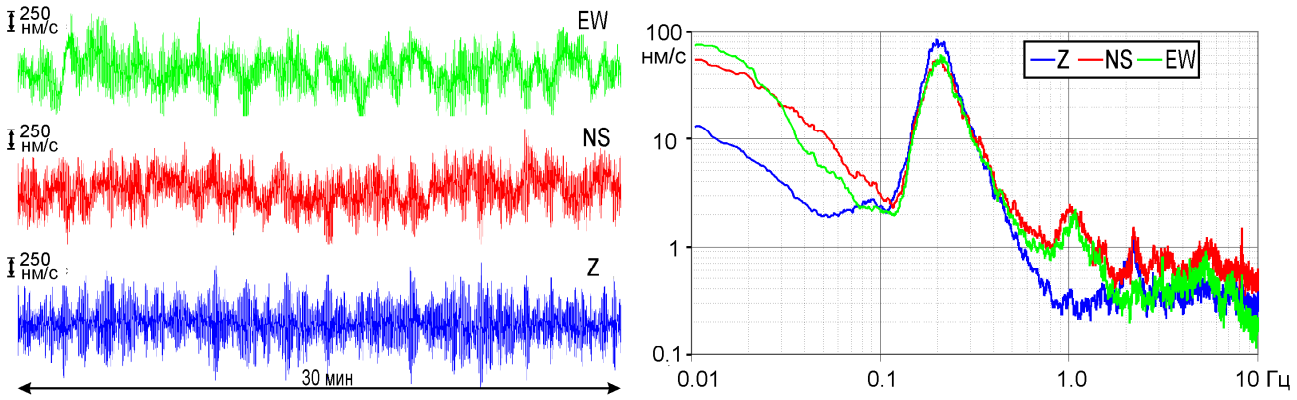

Рис. 2. Фрагмент типичной для территории ВКМ 3-х компонентной записи микросейсмического шума и его амплитудно-частотный спектр *(Л.И. Надежка, И.Н. Сафронич, 2003)*

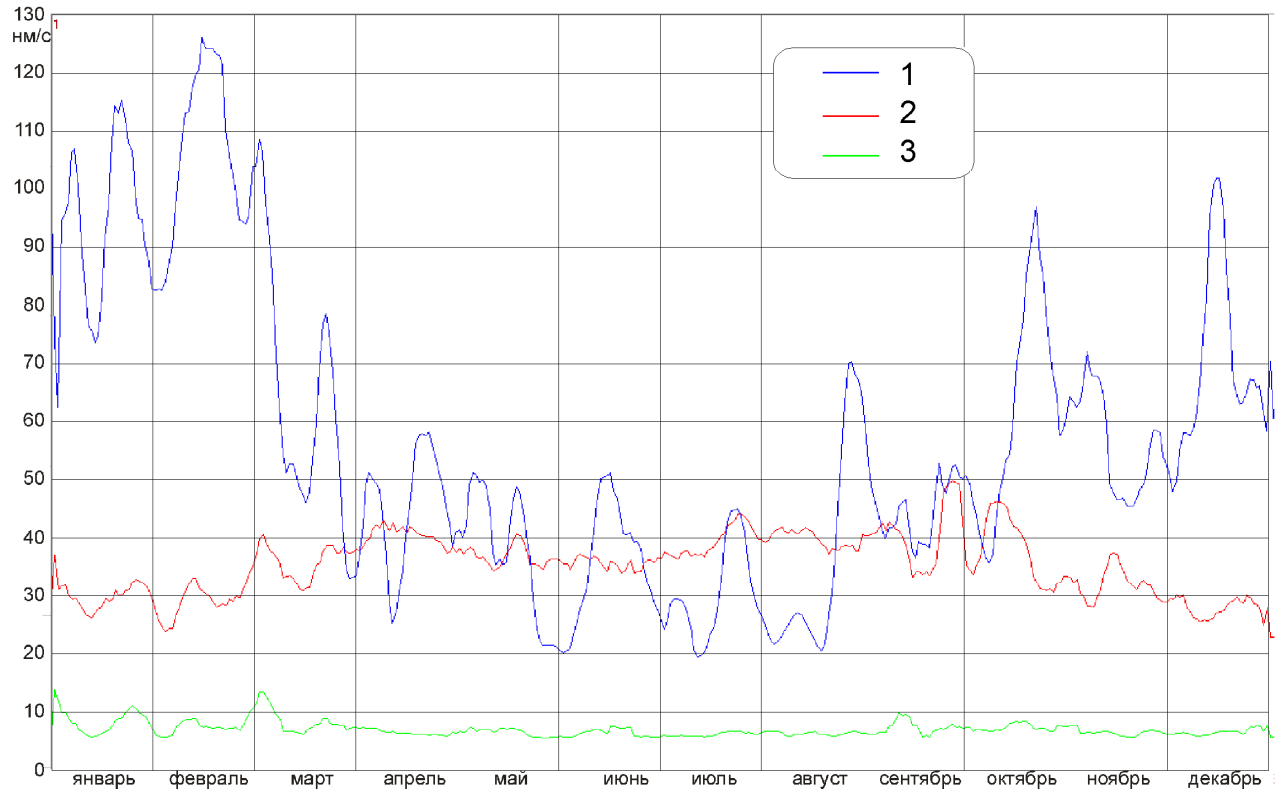

Рис. 3. Вариации среднесуточного уровня микросейсмического шума, измеренного на сейсмической станции «Сторожевое» в течение 2002 года *(Надежка Л.И., Орлов Р.А. и др., 2007)*. Диапазоны частот 1 – 0.1-0.3 Гц; 2 – 1.0-8.0 Гц; 3 – 0.7-1.4 Гц

Особого внимания заслуживают колебания в диапазоне частот 0.7-1.4 Гц, наиболее устойчивые к временным вариациям. Это позволило использовать МСШ в частотном диапазоне 0.7-1.4 Гц в качестве основной составляющей при решении ряда геологических задач. Ранее было показано, что этот диапазон частот меньше всего зависит и от метеорологических факторов.

Методика полевых измерений МСШ и обработки полученных результатов

В процессе экспериментальных исследований выработана оптимальная и рациональная методика полевых измерений МСШ в условиях платформы и промышленно развитого региона. Всего в центральной и восточной частях ВКМ в различных геологических условиях выполнены измерения на 122 пунктах на площади около 70 тыс. км^2.

Перед каждым выездом для проведения экспериментальных работ и по возвращению после их окончания выполняется синхронная сверка каналов записи колебаний всех сейсмических станций. Эта операция необходима для установления работоспособности комплектов сейсмических датчиков, их калибровки, изучения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и в конечном итоге получения качественных материалов.

При выборе мест установки станций для изучения МСШ обязательным условием является учет геологических характеристик места размещения сейсмических станций, особенно при решении конкретных геологических задач.

Шаг измерений МСШ при решении геологических задач изменялся от десятков километров между точками при проведении рекогносцировочных и региональных площадных и профильных работ, до первых километров и сотен метров при проведении детальных работ на локальных объектах.

Проведение исследований в условиях плотно населенного региона с интенсивной хозяйственной деятельностью, вызывающей многочисленные помехи в запись МСШ, существенно увеличивает длительность измерений**.** Как показал опыт работ, оптимальная продолжительность измерений на пункте должна составлять не менее суток. Такой промежуток времени позволяет выполнить весь технологический цикл измерений и получить объективную характеристику МСШ на пункте.

Принципиально важным моментом методики измерений МСШ является выбор опорного пункта. Он выполняет несколько функций при обработке результатов полевых измерений. Во-первых, измерения на опорном пункте используются для учета временных вариаций. Во-вторых, долговременный опорный пункт позволяет приводить к одному уровню (нормировать) измерения разных лет, накапливать их и использовать для решения разнообразных задач *(Надежка, Орлов, 2009).*

Алгоритм основных этапов обработки и интерпретации результатов измерений представлен на рис. 4. Важными этапами обработки результатов площадных измерений являются: полосовая фильтрация записей МСШ в выбранном информативном диапазоне частот (например 0.7-1.4 Гц), вычисление отношения горизонтальной к вертикальной составляющей МСШ. При изучении распределения МСШ по глубине определяющим является вычисление синхронных амплитудно-частотных спектров на базовом и полевых пунктах.

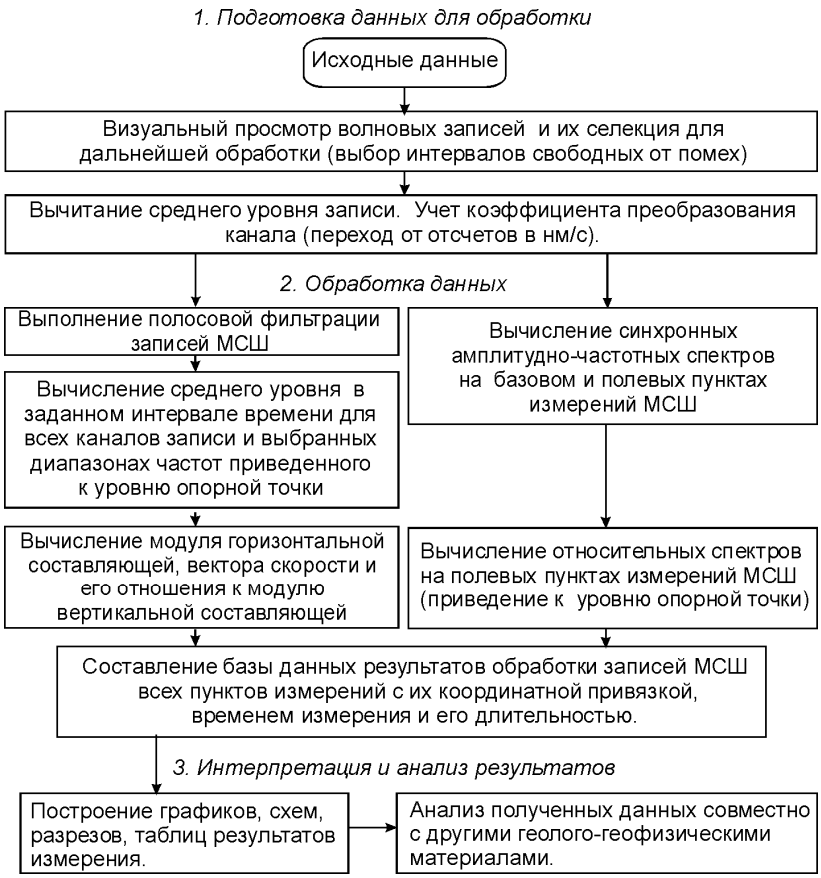

Рис. 4. Алгоритм основных этапов обработки и интерпретации результатов измерения МСШ

Обработка информации осуществлялась с применением программного комплекса WSG (Красилов, 2000), разработанного специалистами Геофизической службы РАН (А.П. Акимов и др.). Определение статистических характеристик МСШ осуществлялось, как правило, на базе 20-минутного интервала записи. При изучении характерных особенностей микросейсмического процесса широко применялась частотная фильтрация с последующим определением статистических характеристик микросейсмического шума в заданных диапазонах частот.

Выводы. Определены основные методические приемы выполнения инструментальных измерений микросейсмического шума в условиях ВКМ. Предлагаемая методика полевых измерений с использованием опорной точки является наиболее эффективной и оптимальной. Показано, что временные вариации интенсивности МСШ, вызванные как естественными, так и антропогеновыми причинами, требуют их учета при использовании микросейсмического шума для решения геологических задач.

Обработка результатов измерений приведенных относительно опорной точки, в том числе полученных в разные годы, позволяет получить достоверные и обоснованные результаты. Разработанный алгоритм обработки делает возможным исходные данные измерений МСШ довести до конечного результата – интерпретации и анализа. Разработанные приемы фактически являются основой методики измерения параметров МСШ при решении целого ряда геологических задач.

В главе IV «Оценка возможностей использования микросейсмического шума для решения геологических задач» рассмотрены практические примеры решения ряда региональных и локальных задач по изучению геологического строения и напряженного состояния отдельных сегментов литосферы ВКМ.

Характер отражения в МСШ неотектонических структур ВКМ

Наиболее крупными неотектоническими структурами ВКМ являются Среднерусская возвышенность и Окско-Донская впадина. Зонами их сочленения являются крупные линейные прогибы.

В результате анализа пространственного распределения МСШ более чем в 100 пунктах, расположенных в разных неотектонических структурах (рис. 5), установлено:

1. Линейные прогибы характеризуются повышением уровня горизонтальной и вертикальной составляющих микросейсмического шума относительно базового пункта Сторожевое в 1.5-2 раза.

2. Штамповые структуры Среднерусского блока отмечены низким уровнем шума (до 0.5 значения на Сторожевом). Поднятие в пределах Окско-Донской впадины имеет уровень шума, сопоставимый с базовой точкой (0.7-1.0 на Сторожевом).

3. Отдельным фрагментам субширотных зон глубинных коромантийных разломов 2-го ранга в фундаменте (рис. 5, 6б) в новейшем комплексе соответствуют прогибы, отмеченные повышенным уровнем сейсмического шума. Между этими широтными структурами осевая линия средней части прогиба по сейсмическим шумам отчетливо смещена к западу на 30-50 км.

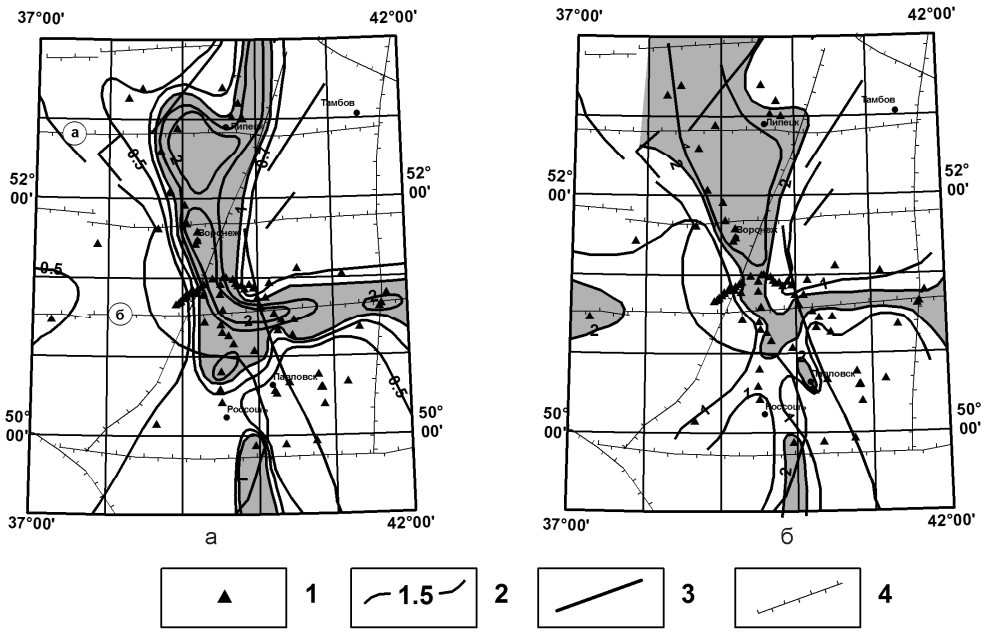

Рис. 5. Изолиний амплитуд горизонтальной (а) и вертикальной (б) составляющих сейсмического шума в диапазоне частот 0.7-1.4 Гц на тектонической схема кристаллического фундамента (*Орлов Р.А. , 2008*). 1 – пункт измерения сейсмического шума; 2 – изолинии амплитуд сейсмического шума в относительных единицах; глубинные разломы, коромантийные: 3 – 1-го ранга (надвиги); 4 – 2-го ранга (сбросо-сдвиги); а – Трубчевско-Липецкой, б – Суджано-Икорецкий

Другим информативным параметром микросейсмического шума при изучении неотектонической структуры ВКМ является отношение амплитуд горизонтальной и вертикальной составляющих (рис. 6).

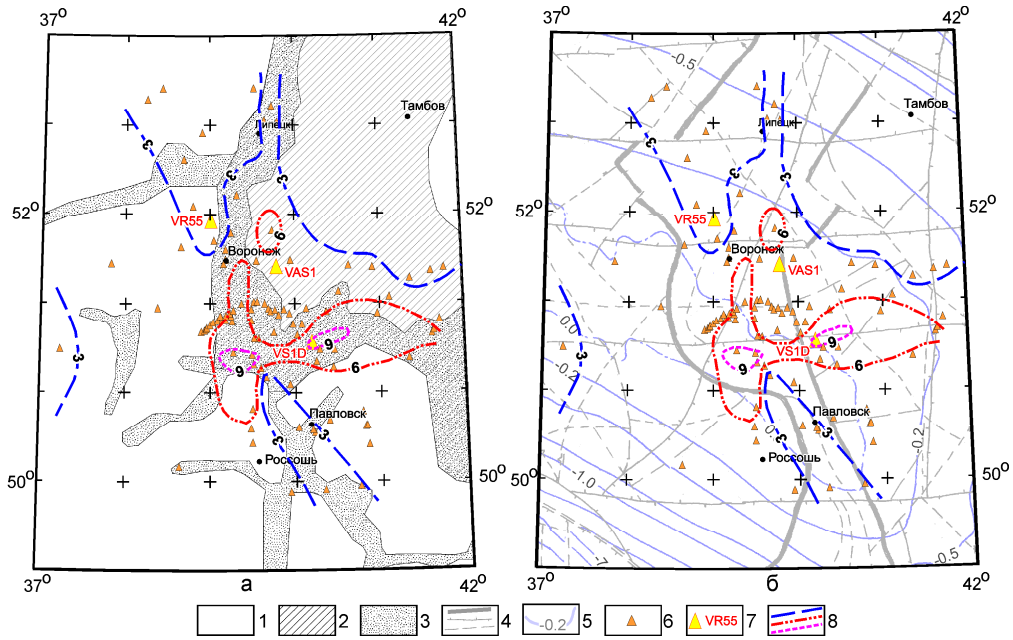

Рис. 6. Отношений амплитуд горизонтальной и вертикальной составляющих микросейсмического шума в диапазоне частот 0.7-1.4 Гц (а) на фрагменте неотектонической схемы ВКМ и (б) фрагменте тектонической схемы кристаллического фундамента *(Орлов Р.А., 2009)*. 1 – Среднерусская возвышенность; 2 – Окско-Донская впадина; 3 – линейные прогибы; 4 – разломы глубинного заложения 1-3 ранга; 5 – изолинии абсолютных отметок фундамента (км); 6 – пункты регистрации микросейсмического шума; 7 – пункты на которых изучались траектории движения частиц грунта; 8 – изолинии отношения Ан/Az

Средняя величина A_H/A_Z равна 4.5. В тоже время в центральной части ВКМ, на границе Среднерусского поднятии и Окско-Донской депрессии выделена область, где величина отношения стабильно больше 6. В целом область значительного преобладания горизонтальной составляющей колебаний над вертикальным совпадает с прогибами, которые являются структурами Окско-Донской впадины. Можно предположить, что данным параметром выделяются блоки с различной кинематикой новейших структур.

Области повышенных значений A_H/A_Z увязываются с отдельными отрезками крупных тектонических нарушений субширотного и северо-восточного простирания, выделенных в кристаллическом фундаменте ВКМ. Этот факт может свидетельствовать о генетической связи новейших структур с глубинной тектоникой и напряженно-деформационным состоянием геологической среды.

Выводы:

- структурно-геологическое строение и новейшая геодинамика на ВКМ находят убедительное отражение в параметрах МСШ;

– различия в уровнях сейсмического шума связаны не только с отличиями структурно-вещественных комплексов осадочного чехла, но и структурным разуплотнением пород кристаллического фундамента;

– значительное возрастание амплитуды сейсмического шума и повышенных значений A_H/A_Z на границе Среднерусской возвышенности и Окско-Донского прогиба подтверждает идею, высказанную ранее, о том, что в некоторых отношениях Окско-Донской прогиб напоминает рифтовые впадины. Косвенным подтверждением этой гипотезы является наличие в Масальском линейном прогибе (Суджано-Икорецкий разлом в фундаменте) месторождения радоновых вод «Богатое», связанное с гранитоидами лискинского комплекса. Известно, что радон используют в качестве индикатора проницаемых зон, выходящих на поверхность (исследования Ю.П. Булашевича, В.И. Уткина).

Отражение крупных структурных блоков фундамента ВКМ в особенностях МСШ

Выполнено изучение особенностей отображения крупных структурных блоков фундамента ВКМ в поле МСШ вдоль профиля «Курск-Народное», протяженностью около 400 км (рис. 7).

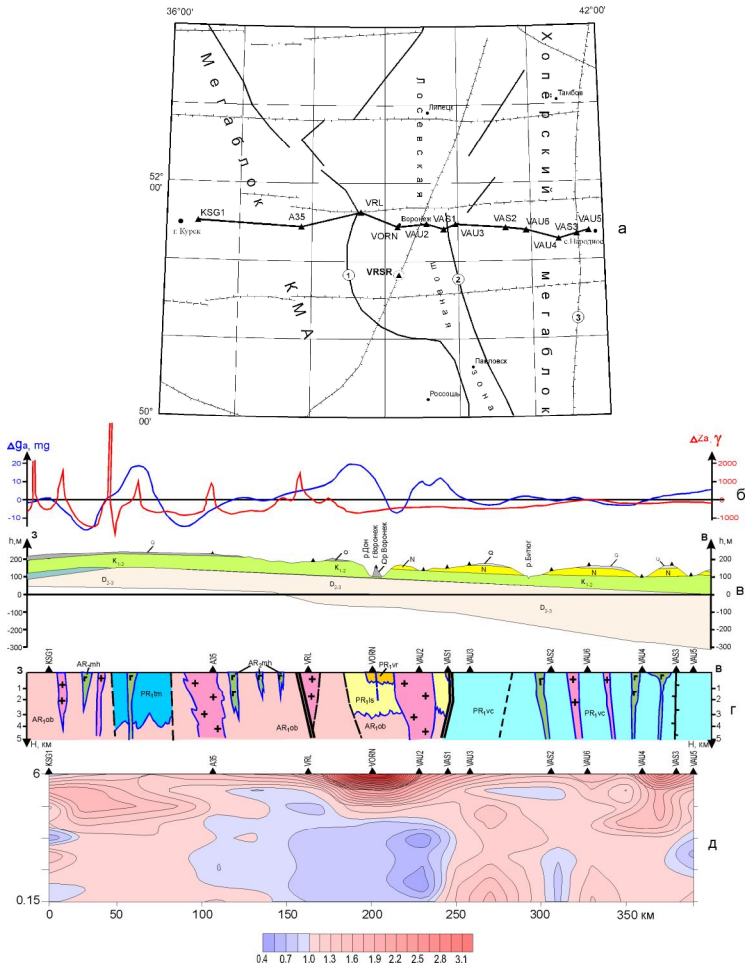

Рис. 7. Результаты геофизических работ по профилю «Курск–Народное». а – положение профиля на тектонической схеме кристаллического фундамента (разломы 1-го порядка: 1 – Ряжско-Кантимировский; 2 – Лосевско-Мамоновский; 3 – Шумилинско -Новохоперский); б – графики поля силы тяжести и магнитного поля *(Вассерман И.С., 1996);* в – схематизированный геологический разрез осадочного чехла; г – геологический разрез кристаллического фундамента *(Лебедев И.П., 2009);* д – распределение амплитуд микросейсмического шума в диапазоне частот 0.2-6.0 Гц в вертикальной плоскости

1. В западной части профиля на частотах 0.15-1 Гц фиксируется практически однородное, слабо дифференцированное поле МСШ. Можно констатировать, что скоростные и плотностные характеристики кристаллического фундамента в пределах мегаблока КМА и ЛШЗ близки и слабо дифференцированы (оценочная глубинна изучения МСШ – 5-7 км).

2. В Хоперском мегаблоке отмечается более сложный характер поля МСШ. В интервале частот 1.0-6.0 Гц преобладает субгоризонтальный рисунок изолиний МСШ, а на частотах 0.15-0.6 Гц – субвертикальный. Возможно, это можно объяснить влиянием процессов гранитизации сланцевой толщи.

3. Крупные тектонические нарушения по-разному отражаются в микросейсмическом шуме. Так, сравнительно молодой Шумилинско-Новохоперский разлом девонского возраста, характеризуется повышенной интенсивностью МСШ. Уровень МСШ в зоне геодинамического воздействия Лосевско-Мамоновского разлома понижен.

Выводы. Установлено, что крупные региональные геолого-геодинамические неоднородности платформенной литосферы находят отражение в интенсивности микросейсмического шума на различных частотах, существенно дополняя информацию, полученную с помощью традиционных геофизических методов.

Изучение локальных геологических структур на основе анализа МСШ

Объектом исследований явилась зона сочленения Среднерусской возвышенности (СВ) и Окско-Донской впадины (ОДВ).

На рис. 8 изображены результаты работ по изучению характеристик микросейсмического шума на профиле I-I, в зоне сочленения СВ и ОДВ.

Строение и состав осадочного чехла в крупных неотектонических блоках существенно различен (рис. 8г). Известно, что амплитуда МСШ обратно пропорциональна квадрату скорости продольных волн и плотности. Этим можно объяснить значительное увеличение амплитуды микросейсмического шума в диапазоне частот 1-8 Гц (рис. 8а) в менее сейсмически жесткой среде верхнего структурного этажа Окско-Донской впадины. Более чем в два раза возрастает амплитуда колебаний в ОДВ и в диапазоне частот 0.7-1.4 Гц (рис. 8б).

Колебания с частотой 1Гц и ниже формируются на глубинах от 300 и больше, т.е. в стратифицированной части кристаллического фундамента (мощность осадочного чехла в районе исследований не превышает 200 м). Так как вещественный состав фундамента по профилю существенно не меняется, то повышение уровня шума можно объяснить структурной разуплотненностью пород.

Выводы:

– подтверждена горизонтальная расслоенность верхней части разреза фундамента, установленная ранее методом микроОГТ (рис. 8д).
– обоснована связь параметров сейсмического шума с латеральными неоднородностями на уровне осадочного чехла и кристаллического фундамента.

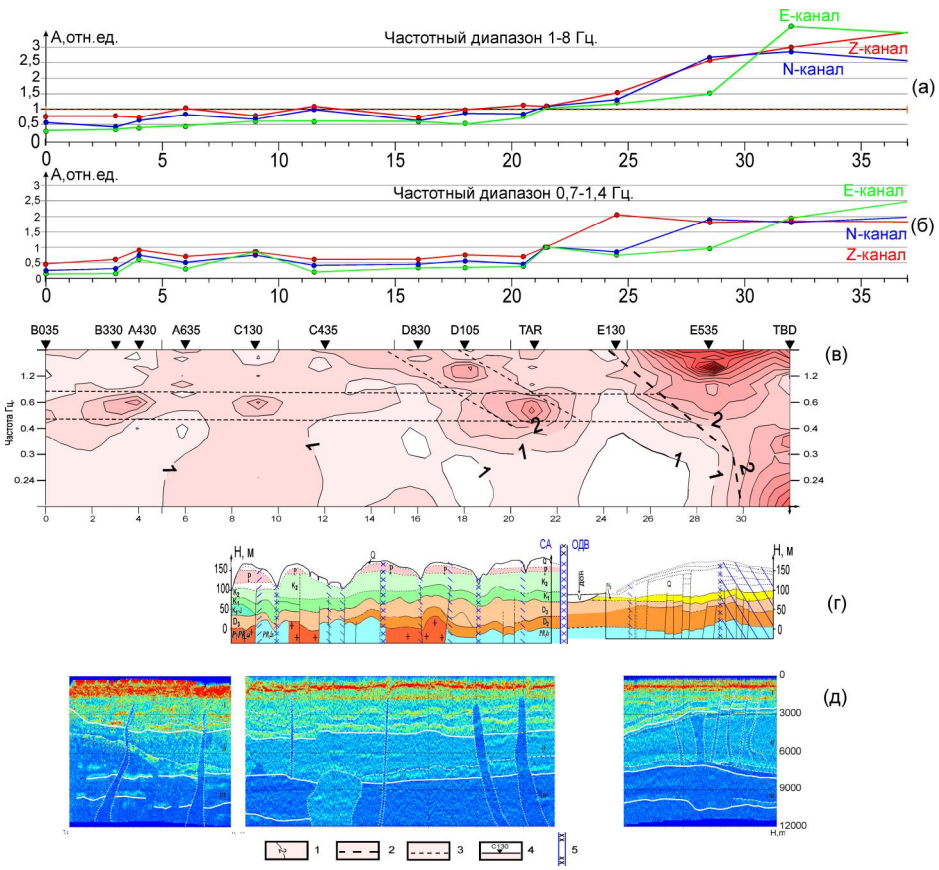

Рис. 8. Геолого-геофизический разрез по профилю I-I *(Орлов Р.А., 2007)*. Результаты измерений уровня микросейсмического шума в диапазоне частот 1.5-8 Гц (а), 0,7-1,4 Гц (б), распределения спектральных амплитуд в вертикальной плоскости. (в), геологический разрез верхнего структурного этажа (г) *(Молоткова Э.А. 2001)*, амплитудный сейсмический разрез кристаллический коры (д) *(Тарков А.П., 2001)*. 1 –изолинии относительного уровня МСШ, 2 – граница блоков по МСШ, 3 – области расслоенности и повышенной трещиноватости, 4 – пункты измерения микросейсмического шума, 5 – зон разграничивающая неотектонические структуры I порядка СП и ОДВ

Отражение в МСШ Курского метеоритного кратера

Курский кратер расположен в пределах мегаблока КМА Воронежского кристаллического массива. Сам кратер и окружающая его рама перекрыта осадочным чехлом мощностью 130-160 м, в состав которого входят породы юры, мела и современные отложения. Породы чехла залегают практически горизонтально. В кольцевом желобе кратера, глубина которого колеблется от 175 до 200 м, буровыми скважинами вскрыты осадочные породы среднего и верхнего девона и нижнего карбона, которые за пределами кратера отсутствуют. Время возникновения Курского кратера оценивается в 250±80 млн. лет. Курский кратер хорошо отражается в гравитационном поле.

Анализ амплитудно-частотных характеристик МСШ по профилю I-I показал, что в северо-западной части профиля на частотах от 8.0 до 2.0 Гц амплитуды микросейсмического шума имеют пониженные значения (0.5-0.75) относительно опорной точки (рис. 9). Повышение уровня шума в юго-восточной часто профиля объясняется сокращением мощности отложений мела и увеличением мощности рыхлых образований надпойменных терасс. Можно констатировать, что характер

микросейсмического шума в диапазоне частот от 2.0 до 8.0 Гц обусловлен особенностями строения осадочного чехла мощностью 120-160 м.

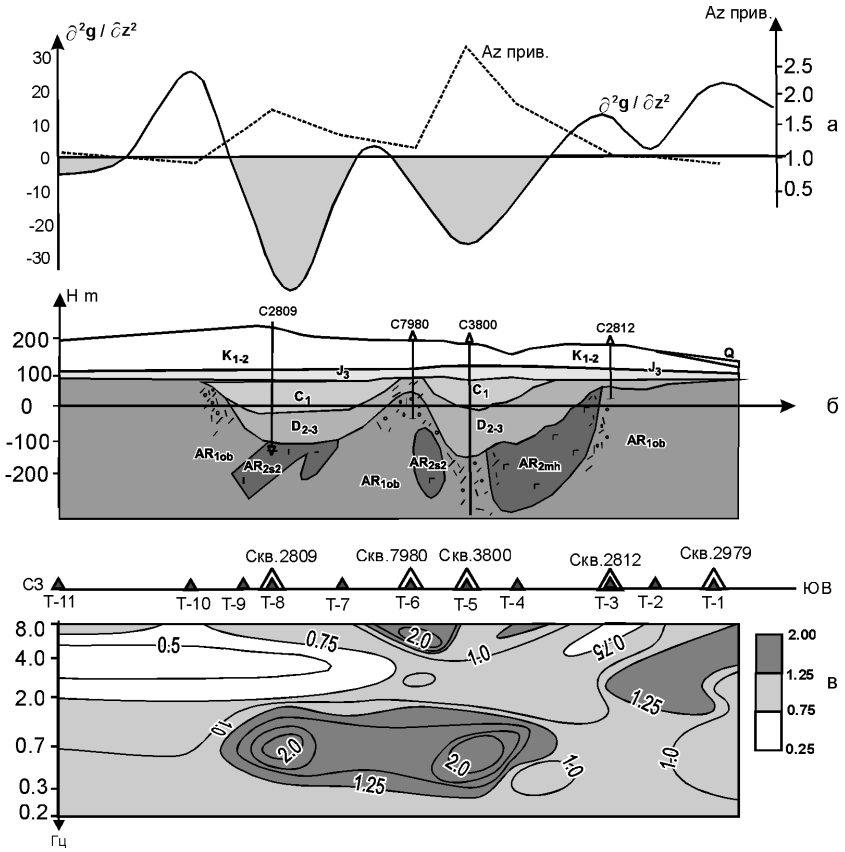

Рис. 9. Результаты геолого-геофизических работ по профилю I-I *(Орлов Р.А., 2010).* а – график d^2g/dz^2 вдоль профиля; б – геологический разрез по данным бурения; в – график интенсивности МСШ на частоте 0.7-1.0 Гц; г – распределение МСШ по глубине в диапазоне частот 8.0-0.2 Гц

Погребенные под толщей юрских и меловых песчано-глинистых отложений, известняки, алевролиты, песчаники, глины и пески среднего и верхнего девона и нижнего карбона, заполняющие локальную впадину в кристаллическом фундаменте, достаточно уверенно выражаются в МСШ. Мощность переслаивающихся образований среднего и верхнего девона и нижнего карбона в кратере составляет от 190 до 240 м. Скважиной № 3800 на глубинах до 560 м вскрыты интенсивно дробленые и сильно трещиноватые породы кристаллического фундамента,

В пределах погребенного кратера аномально высокие амплитуды шума зарегистрированы в диапазоне частот от 0.3 до 1.5 Гц. Этот эффект объясняется влиянием осадочных пород девона и карбона, заполняющих метеоритный кратер и раздробленными и трещиноватыми породами кристаллического фундамента. На частоте ниже 0.3 Гц влияние неоднородностей отсутствует.

Выводы. Локальные структуры типа изученного погребенного кратера (трубки взрыва, зоны повышенной трещиноватости кристаллического фундамента) могут успешно выделяться и изучаться как в плане, так и в разрезе особенно-

стями МСШ, существенно дополняя информацию других геофизических методов, например, гравиметрических съемок.

Показано, что МСШ содержит обширную информацию о структурно-геологических неоднородностях геологической среды различных иерархических уровней. МСШ можно с успехом использовать для регионального районирования, выделения зон тектонических нарушений, геодинамических активных структур, для получения информации о строении и напряженно-деформационном состоянии верхних стратифицированных горизонтов кристаллической коры.

Основные выводы и результаты работы

В результате исследований оценены возможности использования микросейсмического шума для выделения в платформенной литосфере региональных и локальных неоднородностей, как в кристаллическом фундаменте, так и в осадочном чехле.

Хорошая изученность Воронежского кристаллического массива геологическими и геофизическими методами послужила одним из факторов использования его в качестве базового объекта при выполнении исследований, что способствовало получению обоснованных результатов.

В процессе реализации поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Обобщен опыт использования характеристик микросейсмического шума для решения геологических задач в нашей стране и за рубежом.

2. Изучены имеющиеся геолого-геофизические материалы различного масштаба, проанализированы последние научные разработки по региональной геологии ВКМ.

3. Исследована структура и свойства микросейсмического шума на Воронежском кристаллическом массиве и показано что, микросейсмический шум содержит обширную информацию о структурно-геологических неоднородностях и напряженном состоянии платформенной литосферы различных иерархических уровней. Это позволяет рассматривать МСШ как постоянно действующий элемент сейсмического поля, несущий информацию не только о литологическом составе, но и геодинамическом состоянии геологической среды.

4. Разработана оптимальная и рациональная методика полевых измерений и обработки МСШ при решении геологических задач в условиях платформенной литосферы на примере ВКМ; предложен алгоритм обработки результатов полевых измерений, основой которого является учет временных вариаций МСШ и нормирование его параметров с использованием опорного (базового) пункта наблюдений. Показано, что наиболее информативным для решения ряда геологических задач и устойчивым к временным вариациям является частотный диапазон спектра МСШ 0.7-1.4 Гц.

5. Установлена связь параметров микросейсмического шума (уровень шума, отношение амплитуд горизонтальной и вертикальной составляющих в диапазоне частот 0.7-1.4 Гц) с латеральными геологическими неоднородностями и новейшей тектонической структурой крупных блоков ВКМ как на уровне неоген-

четвертичного структурно-вещественного комплекса осадочного чехла, так и кристаллического фундамента.

6. Установлена возможность использования амплитудно-частотных спектров МСШ для решения региональных геологических задач в стратифицированной части кристаллического фундамента.

7. Доказана эффективность использования МСШ при картировании погребенных структур типа Курского метеоритного кратера (трубок взрыва, локальных зон повышенной трещиноватости в фундаменте и т.д.) и изучении литологических особенностей осадочного чехла.

Результаты исследований открывают перспективу практического применения малозатратного метода для изучения геологического строения осадочного чехла и кристаллического фундамента; картирования локальных структур и решения целого ряда других геологических и геодинамических задач.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых отечественных изданиях:

1. Надежка Л.И., ***Орлов Р.А.***, Пивоваров С.П., Сафронич И.Н., Ефременко М.А. О связи параметров сейсмического шума с геологическими и геодинамическими особенностями Воронежского кристаллического массива // Вестник ВГУ. Серия Геология. 2003. №2. С. 63-71.
2. Трегуб А.И., ***Орлов Р.А.*** Изучение сейсмических шумов в комплексе методов исследования тектоники древних платформ (на примере ВКМ) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия геология. 2008. №2. С. 176-180.
3. ***Орлов Р.А.***, Трегуб А.И. Отражение в сейсмических шумах неотектонических структур Воронежского кристаллического массива // Доклады Академии наук. 2009 Т. 426.№3. С. 393-396.

В других изданиях и материалах конференций:

1. Надежка Л.И., ***Орлов Р.А.***, Сафронич И. Н, Пивоваров С.П., Ефременко М.А. Особенности сейсмического шума в различных геодинамических и геологических условиях Воронежского кристаллического массива // Материалы Межд. конф. «Строение, живая тектоника и дислокации платформ и их горноскладчатых обрамлений» М. 2003. С. 177-180.
2. Надежка Л.И., Сафронич И.Н., Пивоваров С.П., ***Орлов Р.А***. и др. Сейсмический эффект массовых химических взрывов в карьере г. Павловска // Межвузовский сборник «Системы жизнеобеспечения и управления в чрезвычайных ситуациях». Воронеж, Гос. тех. ун-тет., 2004. С.99-105.
3. Надежка Л.И. Сафронич И.Н., Пивоваров С.П., Ефременко М.А., ***Орлов Р.А.,*** Сизаск И.А. Некоторые характеристики микросейсмического поля платформенной литосферы (на примере Воронежского кристаллического массива // Мат. семинаров научно-образовательного центра «Волновые процессы в неоднородных и нелинейных средах», Воронеж. ВГУ, 2004. С. 173-189.

4. ***Орлов Р.А.***, Сафронич И.Н., Ефременко М.А., Сизаск И.А. Отражение динамики неотектонических структур в особенностях микросейсмического шума (на примере Воронежского кристаллического массива) // Строение, геодинамика и минерагенические процессы в литосфере. Материалы одиннадцатой межд. науч. конф. Сыктывкар, 2005. С. 268-270.
5. Надежка Л.И., Пивоваров С.П., ***Орлов Р.А.***, Ефременко М.А., Сафронич И.Н. Характер микросейсмического поля в различных геодинамических и геологических условиях Воронежского кристаллического массива // Геодинамические, сейсмологические и геофизические основы прогноза землетрясений и оценки сейсмического риска. Алматы: Институт сейсмологии МОН РК, 2005. С. 260-265.
6. Надежка Л.И., Сафронич И.Н., Пивоваров С.П., Ефременко М.А., ***Орлов Р.А.*** Динамика микросейсмического поля платформенной литосферы (на примере Воронежского кристаллического массива) // Мат. Третьего междун. симпозиума «Геодинамика и геоэкология высокогорных регионов в XX веке», Кыргызстан, Бишкек, 2005. С.81-83.
7. Надежка Л.И., ***Орлов Р.А.***, Сизаск И.А., Сафронич И.Н. Выделение динамически активных зон на основе анализа микросейсмического шума //Фундаментальная наука региону: сборник научных работ по итогам выполнения проектов региональных конкурсов РФФМ 2003 и 2005 гг. по Воронежской области. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2006. С 110-114.
8. ***Орлов Р.А.***, Сизаск И.А., Надежка Л.И., Сафронич И.Н Региональные особенности сейсмического шума в центральной и восточной части воронежского кристаллического массива. Методика изучения и первые результаты // Активные геологические и геофизические процессы в литосфере. Методы, средства и результаты изучения. Материалы XII Международной конференции. Воронеж, 2006. С. 42-48.
9. Надежка Л.И., Сафронич И.Н., ***Орлов Р.А.***, Пивоваров С.П. Воронежский кристаллический массив // Землетрясения Северной Евразии в 2000 году. Обнинск: ГС РАН, 2006. С. 193-196.
10. ***Орлов Р.А.***, Сизаск И.А., Надежка Л.И., Сафронич И.Н. Региональные особенности сейсмического шума в центральной и восточной части воронежского кристаллического массива. Методика изучения и первые результаты // Активные геологические и геофизические процессы в литосфере. Методы, средства и результаты изучения. Материалы XII Между. конф. Воронеж, 2006. С. 42-48.
11. ***Орлов Р.А.***, Сизаск И.А. Опыт оценки природы микросейсмического шума (на примере восточной части Воронежского кристаллического массива) // Междун. конференция: Изменяющаяся геологическая среда: Пространственно-временные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов. Казань: Из-во Казан. гос. универ., 2007. С. 260-264.
12. ***Орлов Р.А.***, Надежка Л.И., Сизаск И.А. Техногенное воздействие на геологическую среду крупных городов: причины, следствие. Методы изучения //

Матер III-й междун. научно-практ. конфер.: Обеспечение экологической безопасности в чрезвычайных ситуациях. Воронеж, 2007. Часть I. С. 19-26.
13. Надежка Л.И., Сафронич И.Н., ***Орлов Р.А.***, Ефременко М.А. Микросейсмические исследования на территории ВКМ // Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы Кн. 2: Микросейсмичность. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. С. 48-81.
14. Надежка Л.И., ***Орлов Р.А.***, Сафронич И.Н. и др. Воронежский кристаллический массив // Землетрясения Северной Евразии в 2002 году сб.- ГСРАН, Обнинск. 2008. С. 247-254.
15. Надежка Л.И., Сафронич И.Н., Пивоваров С.П., Ефременко М.А., ***Орлов Р.А.*** Динамика микросейсмического поля платформенной литосферы (на примере Воронежского кристаллического массива) // Геодинамика и геоэкология высокогорных регионов в XXI веке. Бишкек, 2008. №3 С. 34-39.
16. ***Орлов Р.А.***, Трегуб А.И. Сейсмический шум и картирование элементов новейшей тектоники территории Воронежского кристаллического массива // Материалы Между. конфер.: Месторождения природного и техногенного минерального сырья: геология, геохимия, геохимические и геофизические методы поисков, экологическая геология. Воронеж: Воронежпечать, 2008. С. 170-173.
17. ***Орлов Р.А.***, Надежка Л.И., Ежова И.Т., Ипполитов О.М. Техногенная сейсмичность Воронежского региона // Обеспечение экологической безопасности в чрезвычайных ситуациях: материалы IV Между. науч.-практ. конф. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2008. Ч.1. С. 45-50.
18. ***Орлов Р.А.***, Надежка Л.И., Сафронич И.Н. Опыт использования отношения средних модулей амплитуд горизонтальной и вертикальной составляющих микросейсмического шума при изучении геологического строения платформенных территорий (на примере Воронежского кристаллического массива) // Геологические опасности: Материалы XV Всероссийской конференции с межд. участ. Архангельск. Институт экологических проблем Севера АНЦ УрО РАН, 2009. С. 347-350.
19. Надежка Л.И., ***Орлов Р.А.***, Ефременко М.А. и др. Особенности организации и проведения полевых сейсмологических наблюдений на территории Воронежского кристаллического массива // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Четвертой международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2009. С.122-126.
20. ***Орлов Р.А.***, Надежка Л.И., Кучеренко В.И., Сафронич И.Н. Опыт картирования локальных геологических неоднородностей в кристаллической коре на основе анализа микросейсмического шума // Структура, свойства, динамика и минерагения литосферы Восточно-Европейской платформы: Матер. XVI Межд. конф. Воронеж: Научная книга, 2010. Т. II. С.113-117.