

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В УСЛОВИЯХ ПЛАТФОРМЫ (НА ПРИМЕРЕ ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА)

Р. А. Орлов

Геофизическая служба Российской академии наук

Поступила в редакцию 28 февраля 2011 г.

Аннотация. Рассмотрены некоторые особенности микросейсмического шума (МСШ) и возможности использования его при решении ряда геологических задач: при картировании неотектонических структур, выделении крупных мегаблоков кристаллического фундамента, изучении локальных структур. Делается вывод о перспективности этого направления исследований, особенно в комплексе с традиционными методами геофизических работ.

Ключевые слова: микросейсмический шум (МСШ), спектральные характеристики, кристаллический фундамент, осадочный чехол, неотектоническая структура, локальные геологические неоднородности.

Abstract. In the present work, some peculiarities of microseismic noise and possibilities of using it for solving the whole number of geological tasks were analyzed. These tasks are: mapping of new tectonic structures, definition of large blocks of crystalline basement internal local forms. Some conclusions are made on the prospects of using the microseismic noise in combination with other geophysical fields for solving different problems of geology.

Key words: microseismic noise, spectral characteristics, crystalline basement, sedimentary cover, neotectonic structure, local geological heterogeneities

Введение

Естественный микросейсмический шум (МСШ) являются объектом изучения экспериментальной и теоретической сейсмологии, начиная с момента их открытия в конце XIX века. Он присутствует как на поверхности Земли, так и во внутренних точках среды и проявляется в широком диапазоне частот, а его амплитуда варьирует в интервале от десятков нанометров (нм/с) до микрометров.

Изучение МСШ является актуальной задачей. Во-первых, он содержит 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. Немаловажным фактором является и экономическая составляющая методики исследования, так как она не связана с применением дорогостоящих искусственных источников возбуждения колебаний [1].

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 вариации 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 [2].

Существующие методы пассивной сейсмологии, использующие микросейсмический шум Земли, можно разделить на две группы – дисперсионные и статистические. Основой методов второй группы, которые здесь рассматриваются, является зависимость пространственного распределения статистических характеристик МСШ от свойств геологической среды. В результате математического моделирования в ИФЗ А.В. Горбатовым [3, 4] было установлено, что если модельную неоднородность постепенно приближать к поверхности, то, начиная с некоторой глубины, волна начинает с ней взаимодействовать – на поверхности Земли над высокоскоростными неоднородностями спектральные амплитуды определенной частоты f уменьшаются, а над низкоскоростными неоднородностями возрастают. Частота f связана с глубиной залегания неоднородности H и скоростью

фундаментальной моды волны Рэлея $V_R(f)$ соотношением $H = 0.5V_R(f)/f$.

1. Некоторые особенности МСШ на территории ВКМ

Структура микросейсмического волнового поля, непрерывно наблюдаемого в любом пункте измерений, тесно связана со структурой и геологией земной коры. Для решения геологических задачи необходимо четкое представление об амплитудно-частотных характеристиках микросейсмического шума, его природе и временных вариациях в условиях платформы. Амплитудно-частотный спектр – одна из важных информативных характеристик микросейсмического процесса, которая очень чувствительна к структурным и геодинамическим условиям геологической среды в районе измерений. На рис. 1 приведен спектр микросейсмического поля, типичного для геологических условий Воронежского кристаллического массива [5].

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 Z-компоненты МСШ на частотах 0.7–1.4 Гц, область спектра на границе низко- и высокочастотных колебаний, наиболее стабильная при сейсмических бурях и техногенных помехах; IV – высокочастотная область спектра (1.5–10 Гц), в которой значительный вклад в амплитуду колебаний, наряду с естественными (экзогенными) источниками шума, вносят техногенные помехи.

2. Оценка возможностей использования микросейсмического шума для решения геологических задач в условиях платформы

Характер отражения в МСШ неотектонических структур ВКМ. Наиболее крупными неотектоническими структурами ВКМ являются Среднерусская возвышенность (СВ) и Окско-Донская впадина (ОДВ), а зонами их сочленения линейные прогибы [6]. В результате изучения пространственного распределения параметров МСШ в восточной части ВКМ в 120 пунктах измерений (рис. 2) было установлено:

- линейные прогибы характеризуются повышением уровня микросейсмического шума относительно базового пункта Сторожевое в 1.5–2 раза, как горизонтальной, так и вертикальной составляющих;
- штамповые структуры Среднерусского блока отмечены низким уровнем шума (до 0.5 значения

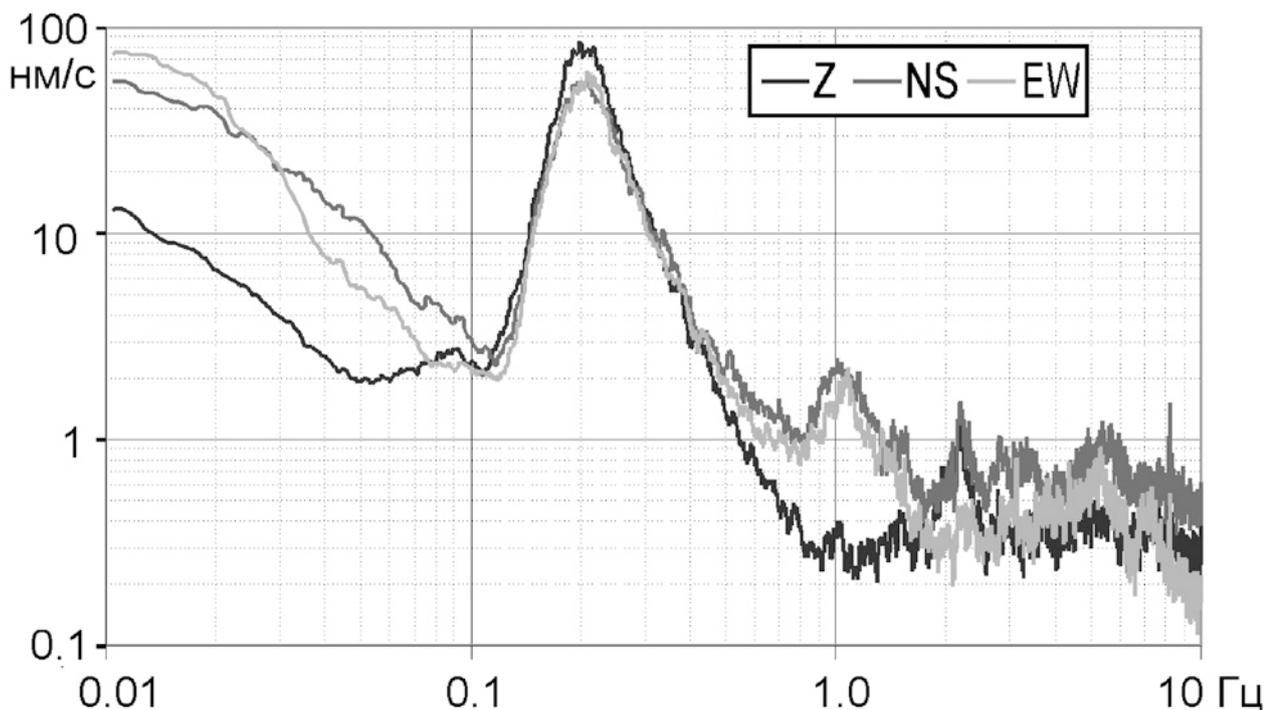


Рис. 1. Типичной для территории ВКМ амплитудно-частотный спектр микросейсмического шума

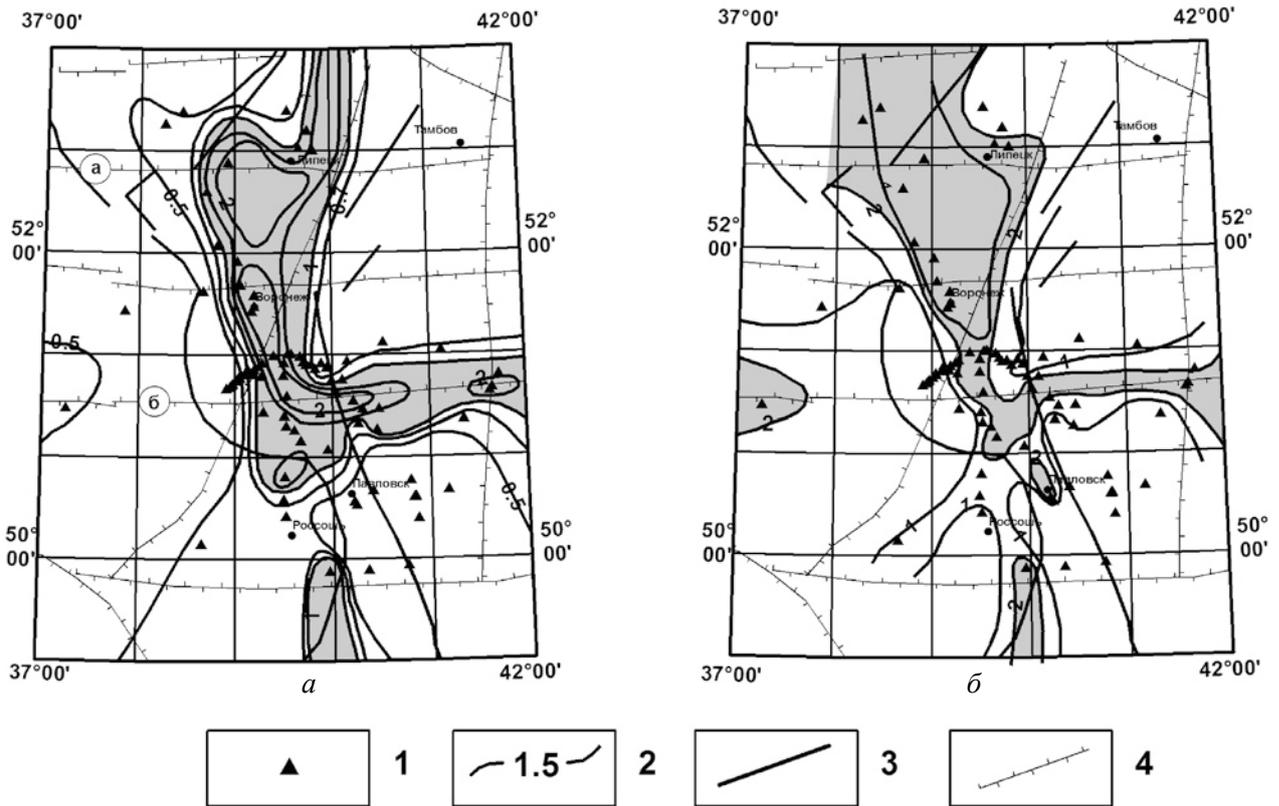


Рис. 2. Изолинии амплитуд горизонтальной (а) и вертикальной (б) составляющих сейсмического шума в диапазоне частот 0.7–1.4 Гц на тектонической схема кристаллического фундамента: 1 – пункт измерения сейсмического шума; 2 – изолинии амплитуд сейсмического шума в относительных единицах; глубинные разломы,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

на Сторожевом). Поднятие в пределах ОДВ имеет уровень шума, сопоставимый с базовой точкой (0.7–1.0 на Сторожевом);

– отдельным фрагментам субширотных зон глубинных коромантийных разломов 2-го ранга в фундаменте (рис. 2, 3б) 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.

Другим информативным параметром микросейсмического шума при изучении неотектонической структуры ВКМ является отношение амплитуд горизонтальной и вертикальной составляющих, так называемые способ Накамуры (рис. 3). Показано, что область значительного преобладания горизонтальной составляющей колебаний совпадает с сочленением крупных линейных прогибов – Масальского и Кривоборского (рис. 3а). 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 (рис. 3б). Этот факт может свидетельствовать о генетической связи новейших структур с глубокой 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, так как частотному диапазону МСШ 0.7–1.4 Гц при различных скоростных характеристиках верхней части геологического разреза соответствует глубина от 200 до 500 м;

– значительное возрастание амплитуды сейсмического шума и повышенных значений A_H/A_Z

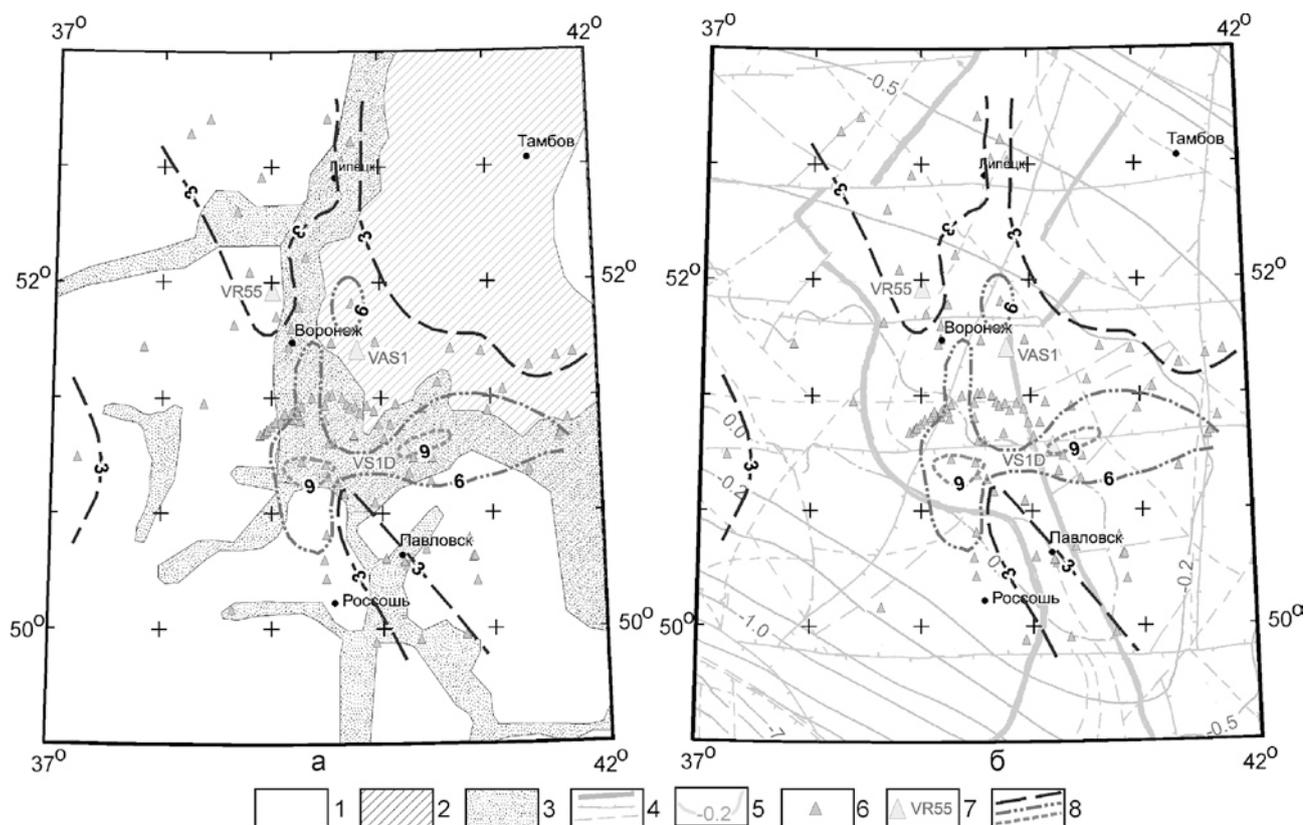


Рис. 3. Отношения амплитуд горизонтальной и вертикальной составляющих микросейсмического шума в диапазоне частот 0.7–1.4 Гц (а) на фрагменте неотектонической схемы ВКМ и (б) фрагменте тектонической схемы кристаллического фундамента: 1 – Среднерусская возвышенность; 2 – Окско-Донская впадина; 3 – линейные 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 A_n/A_z

на границе СВ и ОДВ подтверждает идею, высказанную ранее, о том, что в некоторых отношениях Окско-Донской прогиб напоминает рифтовые впадины [7]. Косвенным подтверждением этой гипотезы является наличие в Масальском линейном прогибе (Суджано-Икорецкий разлом в фундаменте, рис 2а) месторождения радоновых вод «Богатое». Известно, что радон используют в качестве индикатора проницаемых зон, выходящих на поверхность.

Выделение по особенностям МСШ крупных мегаблоков кристаллического фундамента ВКМ. Воронежский кристаллический массив традиционно разделяется на два крупных сегмента – мегаблок КМА и Хоперский мегаблок. От мегаблока КМА Хоперский мегаблок отделен Лосевской шовной зоной (Липецко-Лосевским вулканогенным поясом) [8, 9]. Эти особенности геологического строения ВКМ нашли отражение на геологическом разрезе, построенном вдоль профиля «Курск-Народное» вдоль которого были проведены измерения микросейсмического

шума (рис. 4). На профиле протяженностью около 400 км (от Курска до села Народное, севернее г. Новохоперска) были изучены особенности микросейсмического шума и показано насколько амплитудно-частотные характеристики МСШ соответствуют современным представлениям о крупных тектонических структурах ВКМ и локальным структурно-вещественным неоднородностям.

1. В западной части профиля, проходящего по мегаблоку КМА, на частотах 0.15–1.0 Гц наблюдается практически однородная, слабо дифференцированная среда, которая сохраняется и в пределах Лосевской шовной зоны. Можно констатировать, что скоростные и плотностные характеристики верхней части кристаллического фундамента в пределах этих структур близки и слабо дифференцированы. Рязско-Кантемировский глубинный разлом, по которому проводится западная граница Лосевской шовной зоны, в микросейсмическом шуме практически не проявился. Вероятно, этот разлом относится к разряду локальных или

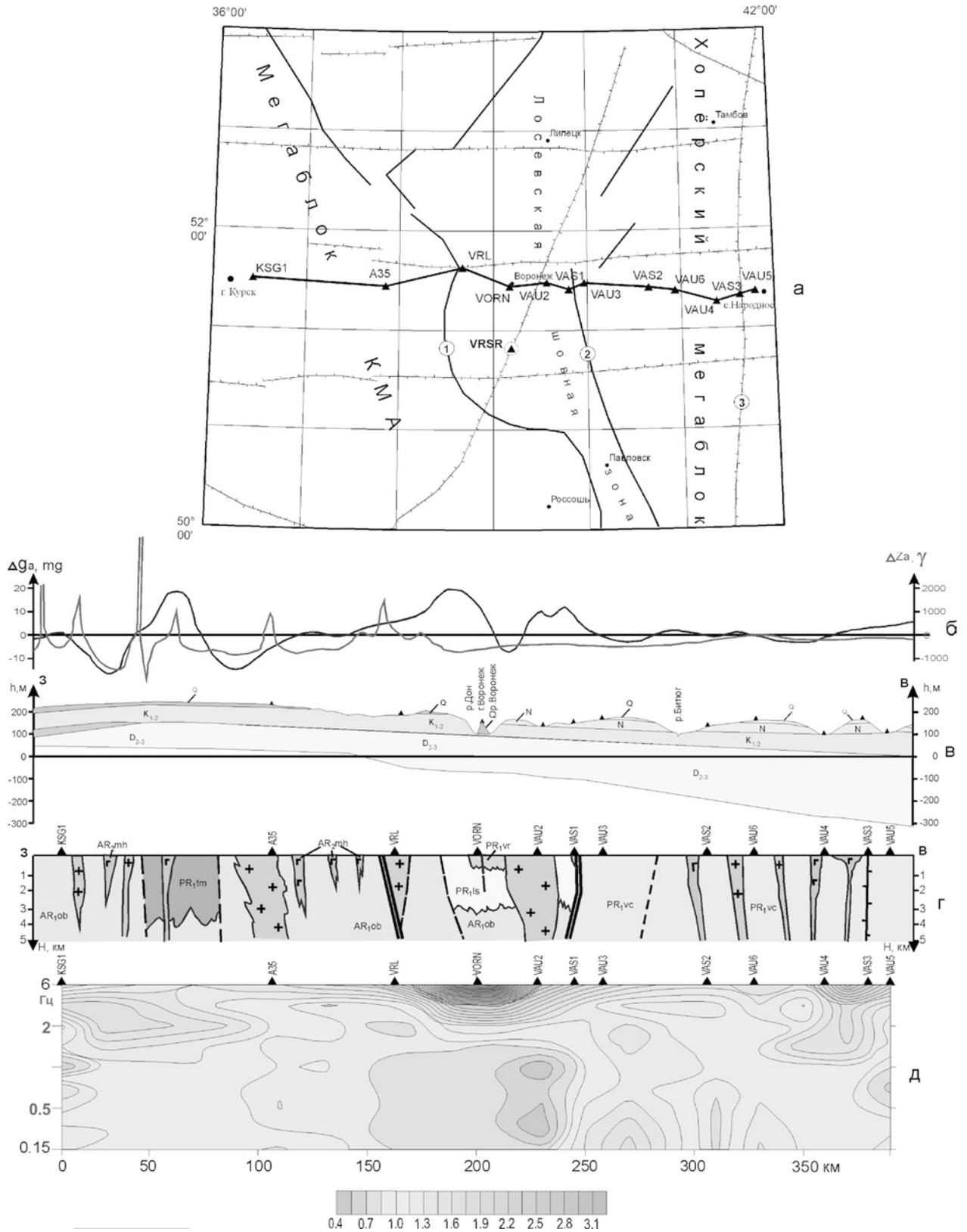


Рис. 4. Результаты геофизических работ по профилю «Курск – Народное»: а – положение профиля на тектонической схеме кристаллического фундамента (разломы 1-го порядка: 1 – Рязжско-Кантимировский; 2 – Лосевско-Мамоновский; 3 – Новохоперский); б – графики поля силы тяжести и магнитного поля (Вассерман И. С., 1996); в – схематизированный геологический разрез осадочного чехла; г – геологический разрез кристаллического фундамента (по И. П. Лебедеву, 2009); д – распределение амплитуд МСШ в диапазоне частот 0.15–6 Гц по вертикали

малоглубинных и не имеет четкого выражения в МСШ.

2. Резкое повышение уровня высокочастотного микросейсмического шума в районе точки наблюдения VORN (район города Воронежа) можно объяснить, по крайней мере, двумя причинами. Это, во-первых, возможное воздействие помех крупного города. Как показал опыт, за пределами крупного населенного пункта амплитуда шума падает, но остается достаточно высокой на значительном расстоянии. Во-вторых, это может быть влияние Кривоборского прогиба на границе СВ и ОДВ, выделенного на схеме неотектоники ВКМ в район г. Воронежа повышенным уровнем шума. Объяснение причин резкого повышения уровня МСШ неоднозначно и требует дополнительных исследований.

3. По характеру спектра микросейсмических колебаний в диапазоне частот 0.15–6 Гц наиболее отчетливо различаются два геоблока – КМА и Хоперский. Граница между ними находится в районе точки наблюдения VAS1 и совпадает с положением Лосевско-Мамонского глубинного разлома, который, судя по картине микросейсмического поля в вертикальном разрезе, носит черты листрического – на глубине породы воронцовского метаморфического комплекса, возможно, подвинуты под кристаллические образования геоблока КМА.

4. Хоперский мегаблок по параметрам микросейсмического шума значительно отличается от мегаблока КМА. Здесь отмечается достаточно сложный характер распределения уровня шума и по латерали и по глубине. В интервале частот 1–6 Гц преобладает субгоризонтальный рисунок изолиний равных значений шума, а на частотах 0.15–0.6 Гц – субвертикальный. Причины такой дифференциации уровня шума на глубине не совсем ясны; возможно, что это влияние процессов гранитизации сланцевой топшщи, связанных с внедрением сравнительно молодых гранитоидов бобровского комплекса.

5. Интересно проявление в микросейсмических шумах сравнительно молодого Шумилинско-Новохоперского разлома меридионального простирания. Хорошо известно, что этот разлом уверенно картируется цепочкой магнитных аномалий над базальтоидными телами девонского возраста на протяжении около 300 км. В пункте измерений VAS3, расположенного в зоне влияния Шумилинско-Новохоперского разлома, отмечаются высокие значения микросейсмического шума в диапазоне частот 1.0–6.0 Гц, при этом с глубиной

отмечается смещение области повышенного шума к западу, что может свидетельствовать о возможном падении зоны разлома и связанных с ней неоднородностей.

Можно предположить, что Шумилинско-Новохоперский разлом находится в настоящее время в состоянии разуплотнения (растяжения), а Лосевско-Мамоновский разлом является границей мегаблоков, резко отличающихся по своим физико-механическим свойствам.

Выводы: проведенный анализ особенностей амплитудно-частотного спектров микросейсмических колебаний и сопоставление их с геологическим строением кристаллического фундамента показали, что спектры микросейсм несут большой объем информации о геологических неоднородностях и позволяют в комплексе с другими методами исследований решать целый ряд задач региональной геологии.

Результаты изучения локальных структур на примере погребенного Курского метеоритного кратера. Курский метеоритный кратер входит в список 15 достоверных метеоритных кратеров, открытых к настоящему времени на территории России. По своим размерам он не относится к разряду крупных, его диаметр составляет 5–6 км, в то время как Калужский кратер, например, имеет диаметр 15 км, а знаменитый Попигайский в Сибири 100 км. Курский кратер, образованный в результате падения небесного тела диаметром несколько сотен метров, относится к разряду захороненных, перекрытых мощным чехлом осадочных отложений и на космических снимках не выражается.

Курский кратер был установлен при проведении гравиметрической съемки. Дефицит плотности в его пределах (0.42 г/см^3) вызывает отрицательную гравиметрическую аномалию величиной до 2–4 мгл. На рис. 5 представлен фрагмент карты (d^2g/dz^2), на котором контрастная аномалия диаметром 5–6 км имеет в эпицентре положительные значения поля, отражающие локальное поднятие кристаллического фундамента.

Курский кратер расположен в пределах мегаблока КМА ВКМ. Кристаллический фундамент, который явился мишенью космического объекта, сложен гранитоидными обоянской серии и ортоамфиболитами михайловской серии архей-протерозоя. Сам кратер и окружающая его рама перекрыта осадочным чехлом мощностью 130–160 м, в состав которого входят отложения среднего девона, юры, мела и современные породы. Породы

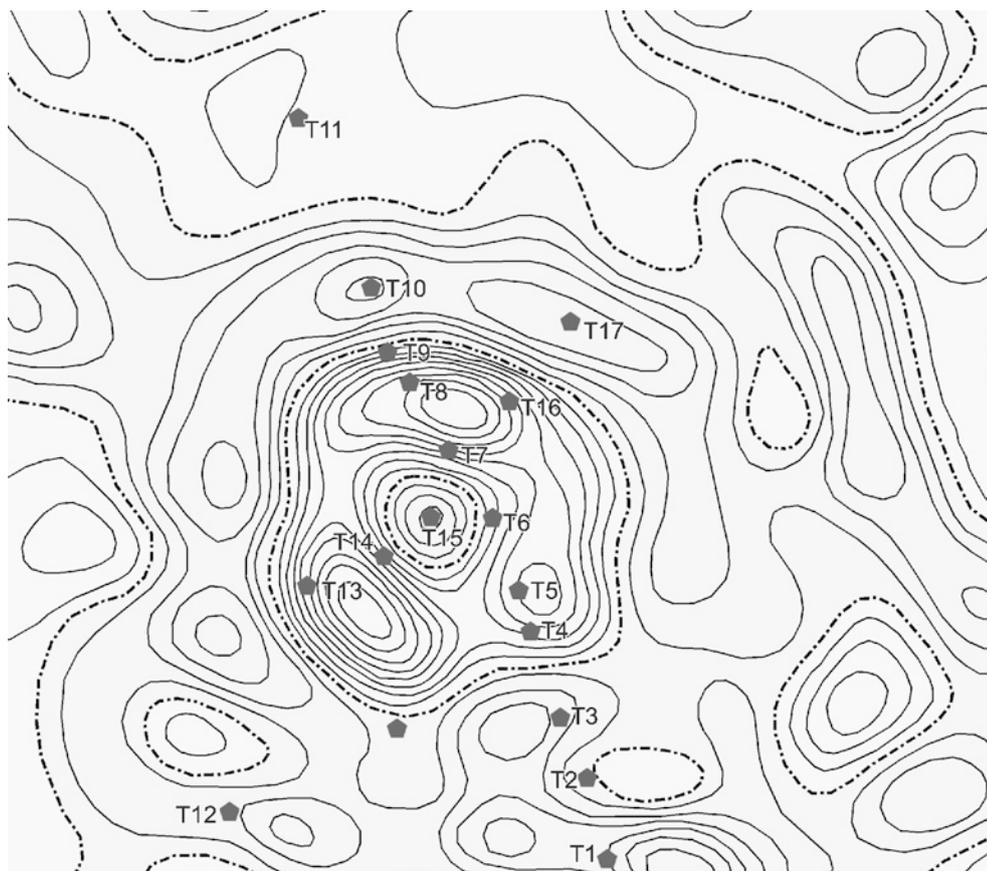


Рис. 5. Отражение погребенного Курского метеоритного кратера в поле силы тяжести (d^2g/dz^2) и полевые пункты измерения микросейсмического шума (Вассерман И. С., 1996)

чехла залегают практически горизонтально. В кольцевом желобе кратера, глубина которого колеблется от 175 до 200 м, 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.

В кратерах диаметром более 3–5 км наблюдается также образование центрального поднятия, которое представляет собой как бы вздутие пород фундамента.

Анализ амплитудно-частотных характеристик МСШ по профилю I-I показал, что структура метеоритного кратера хорошо отражается в распределении спектральных амплитуд (рис. 6).

В северо-западной части профиля на частотах от 8 до 2 Гц амплитуды микросейсмического шума имеют пониженные значения (0.5–0.75) относительно опорной точки а структура спектра в этом диапазоне частот простая, что свидетельствует об однородности пород осадочного чехла, их достаточно высокой плотности. Повышение уровня шума в юго-восточной части профиля (пункты T1 и T2) объясняется сокращением мощнос-

ти отложений мела (размыв их в долине р. Сейм) и увеличением мощности рыхлых образований надпойменных террас. Можно констатировать, что все особенности микросейсмического шума в диапазоне частот от 8 до 2 Гц, связаны с неоднородностями в осадочном чехле, нижняя граница которого находится на глубине 120–160 м.

Погребенные под толщей юрских и меловых песчано-глинистых отложений мощностью 120–160 м, породы среднего, верхнего девона и нижнего карбона, выполняющие локальную впадину в пенепленизированном кристаллическом фундаменте, достаточно уверенно выражаются в микросейсмическом шуме. Мощность переслаивающихся образований среднего, верхнего девона и нижнего карбона в кратере составляет от 190 до 240 м. Плотность и скорость распространения сейсмических волн в этих образованиях значительно ниже, чем во вмещающих породах кристаллического фундамента, сложенного более плотными и высокоскоростными породами. Сейсмическая жесткость осадочных пород ниже, чем у пород фундамента, что и вызывает повышение уровня микросейсмического шума над этой гео-

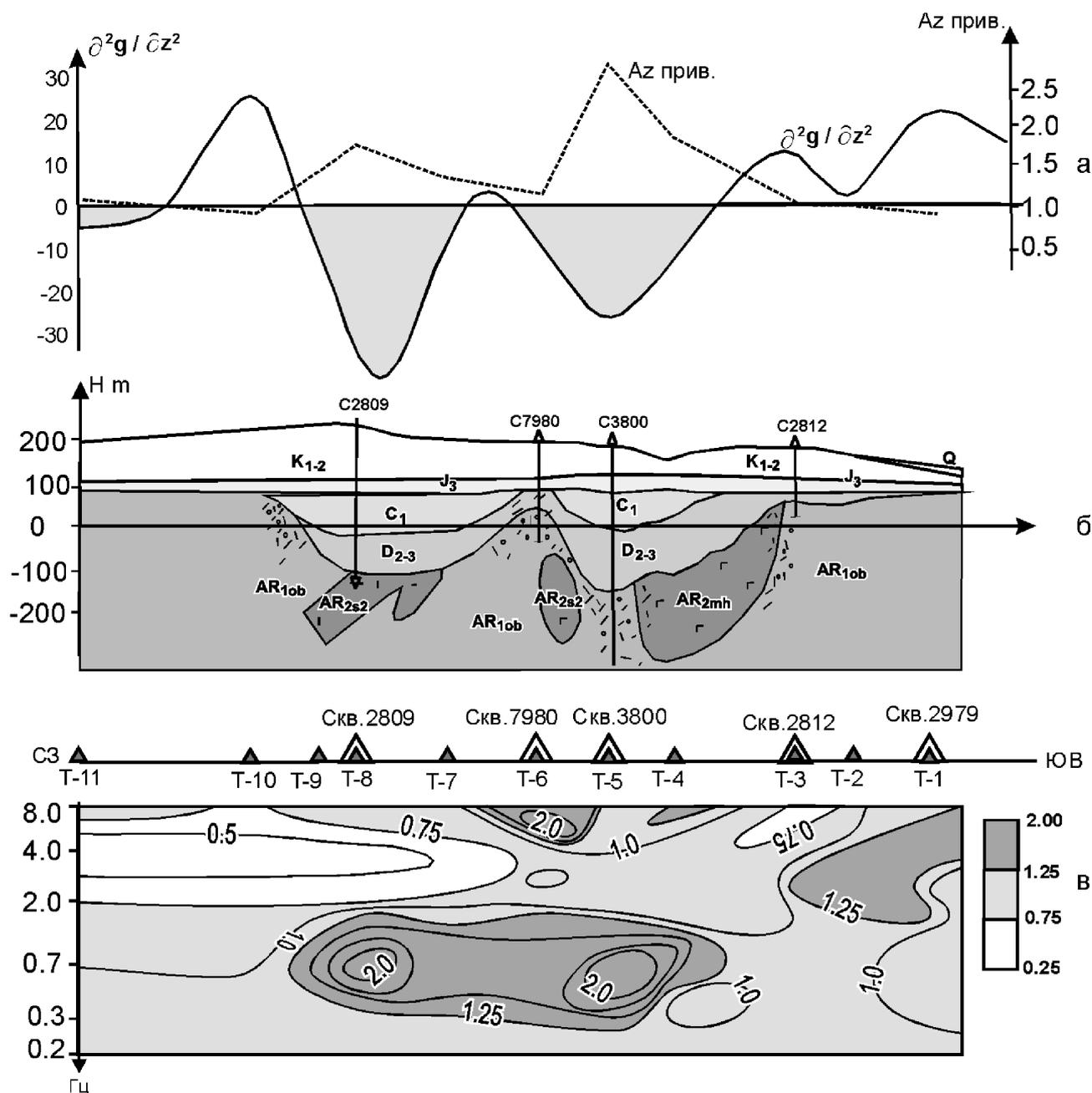


Рис. 6. Результаты геолого-геофизических работ по профилю I–I: а – графики d^2g/dz^2 вдоль профиля и интенсивности микросейсмического шума на частоте 0.7–1.0 Гц; б – геологический разрез по данным глубинного бурения (Кучеренко В.И., 2009); в – результаты микросейсмического зондирования в диапазоне частот 8–0.2 Гц

логической неоднородностью в определенном диапазоне частот. Кроме того, скважиной № 3800 на глубинах до 560 м вскрыты интенсивно дробленые и сильно трещиноватые породы кристаллического фундамента, которые также вносят вклад в аномально высокий уровень шума в пределах кратера на частотах 0.3–1.0 Гц.

Проведенные измерения МСШ подтвердили общую структуру кратера – достаточно крутые склоны и наличие в центре поднятия пород кри-

сталлического фундамента, зафиксированного гравиметрическими работами и бурением.

Подошва юрских пород, перекрывающих кристаллический фундамент за пределами кратера и кровля пород карбона внутри его, находится на абсолютных отметках +70 – +80 м (верхняя граница геологической неоднородности). Нижняя граница установлена с меньшей надежностью, так как фундамент изучен скважинами на небольшую глубину и только одна из них вскрыла дробленые и трещиноватые породы фундамента до глубины

560 м. Дно кратера находится на абсолютных отметках –110–150 м, мощность трещиноватых пород фундамента достигает 230 м. Эти границы можно считать опорными при оценке зависимости между частотой микросейсмического шума и глубиной выделенной геологической неоднородности. На частоте меньше 0.3 Гц влияние неоднородностей на амплитуду МСШ практически не сказывается.

Заключение

В результате проведенных работ 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.

Установлена связь параметров микросейсмического шума (уровень шума, отношение амплитуд горизонтальной и вертикальной составляющих в диапазоне частот 0.7–1.4 Гц и др.) с латеральными геологическими неоднородностями новейшей тектонической структуры ВКМ как на уровне неоген-четвертичного структурно-вещественного комплекса (СВК) осадочного чехла, так и кристаллического фундамента.

Доказана возможность использования МСШ для картирования локальных геологических неоднородностей, детального изучения геологического разреза осадочного чехла и стратифицированной части кристаллического фундамента.

В свете сказанного можно сделать вывод, что использование микросейсмического шума, в комплексе с другими геофизическими методами, будет способствовать повышению эффективности геофизических исследований при решении широкого круга геологических задач на платформах – от региональных до локальных (картирование трубок взрыва при поисках алмазов, выделение участков с повышенной трещиноватостью кристаллического фундамента для обустройства подземных хра-

нилищ газа, инженерно-геологических изысканиях при строительстве важных промышленных объектов, прокладке трубопроводов и т. д.).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Хаврошкин О. Б.* Некоторые проблемы нелинейной сейсмологии / О. Б. Хаврошкин. – М., 1999. – 286 с.
2. *Садовский М. А.* Новые методы сейсмической разведки. Перспективы развития / М. А. Садовский, А. В. Николаев // Вестник АН СССР. – 1982. – № 1. – С. 57–64.
3. *Горбатиков А. В.* Возможность оценки параметров геологических объектов на основе использования фонового микросейсмического поля. Результаты экспериментальных исследований и моделирование / А. В. Горбатиков // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Международной сейсмологической школы. – Обнинск : ГС РАН, 2006. – С. 66–71.
4. *Горбатиков А. В.* Опыт использования микросейсм для оценки состояния верхней части земной коры / А. В. Горбатиков, В. Л. Барабанов // Физика Земли. – 1993. – № 7. – С. 85–90.
5. *Надежка Л. И.* Некоторые характеристики микросейсмического поля платформенной литосферы (на примере ВКМ) / Л. И. Надежка [и др.] // Мат. семинаров научно-образовательного центра «Волновые процессы в неоднородных и нелинейных средах». – Воронеж : ВГУ, 2004. – С. 173–189.
6. *Трегуб А. И.* Неотектоника территории Воронежского кристаллического массива / А. И. Трегуб // Труды научно-исследовательского института геологии Воронежского государственного университета. – Воронеж : Изд-во ВГУ, 2002. – Вып.9. – 220 с.
7. *Копп М. Л.* Кинематика новейшей структуры и сейсмичность Окско-Донского миоцен-четвертичного прогиба / М. Л. Копп, А. А. Никонов, Е. Ю. Егоров // Доклады Академии наук. – 2002. – Т. 385, № 3. – С. 387–392.
8. *Чернышов Н. М.* Современные представления о глубинном строении, геодинамике и металлогении ВКМ / Н. М. Чернышов, В. М. Ненахов // Современная геодинамика, глубинное строение и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов. Материалы международной конференции. – Воронеж, 2001. – С. 18–21.
9. *Щипанский А. А.* Геодинамика восточной окраины Сарматии в полеопротерозое / А. А. Щипанский [и др.] // Геотектоника. – 2007. – № 1. – С. 43–70.

Геофизическая служба РАН

Р. А. Орлов, научный сотрудник лаборатории сейсмического мониторинга
nadezhka@geophys.vsu.ru
Тел. 8 (473) 255-78-44

Geophysics Survey RAS

R. A. Orlov, scientific associate of Laboratory of seismic monitoring
nadezhka@geophys.vsu.ru
Tel. 8 (473) 255-78-44