

УДК 502.08

DOI 10.46916/30092022-3-978-5-00174-701-7

Глава 6.
**ФОНОВОЕ СЕЙСМИЧЕСКОЕ ПОЛЕ КАК НОВЫЙ ЭЛЕМЕНТ
В СТРУКТУРЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ
ФУНКЦИЙ ЛИТОСФЕРЫ**

Сафронич Игорь Николаевич

младший научный сотрудник

ФГБУН ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»

Аннотация: В работе рассмотрено фоновое сейсмическое поле как новый, не используемый ранее структурный элемент раздела экологической геофизики об экологических функциях литосферы. На примере территории Воронежского кристаллического массива показано, что фоновое сейсмическое поле существует, но для его регистрации необходимо использовать сейсмологическое оборудование с низким уровнем собственного шума. В этом случае его параметры становятся важным, недостающим элементом в структуре геофизических экологических функций литосферы. Они дополняют сейсмическое поле его «природной» составляющей. Это расширяет возможности использования сейсмического поля для решения эколого-геофизических задач. Рассчитанные по амплитудно-частотным характеристикам реальных записей параметры позволяют получить его объективные числовые характеристики в населенных пунктах, которые совместно с другими экологическими параметрами территории являются базой для оценки её сейсмических условий и разработки критериев комфортности жизнедеятельности населения.

Ключевые слова: фоновое сейсмическое поле, сейсмический шум, сейсмический фон, техногенная нагрузка, Гауссов белый шум, оценки амплитудного спектра Гауссова белого шума.

**BACKGROUND SEISMIC FIELD IS A NEW ELEMENT
IN THE STRUCTURE OF GEOPHYSICAL ECOLOGICAL FUNCTIONS
OF THE LITHOSPHERE**

Safronich Igor Nikolaevich

Abstract: The paper considers the background seismic field as a new, previously unused structural element of the section of ecological geophysics on the ecological functions of the lithosphere. Using the example of the territory of the Voronezh crystal massif, it is shown that a background seismic field exists, but for its registration it is necessary to use seismological equipment with a low level of intrinsic noise. In this case, its parameters become an important missing element in the structure of geophysical ecological functions of the lithosphere. They complement the seismic field with its "natural" component. This expands the possibilities of using the seismic field to solve ecological and geophysical problems. The parameters calculated from the amplitude-frequency characteristics of real recordings allow us to obtain its objective numerical characteristics in settlements, which, together with other environmental parameters of the territory, are the basis for assessing its seismic conditions and developing criteria for the comfort of the population.

Key words: background seismic field, seismic noise, seismic background, technogenic load, Gaussian white noise, estimates of the amplitude spectrum of Gaussian white noise

Введение

Экологическая геология, зародившаяся на стыке геологических и биологических наук, изучает воздействие "неживого", представленного в виде компонент литосферы, включая техногенно измененные, на "живое", которое представляется биотой, включающей и человека, рассматривая его не только

как биологический вид, но и социальную структуру. В процессе эволюции человек всегда находился под постоянным «энергетическим» воздействием (в *энергетическом поле*), которое и сформировало естественное геологическое, а точнее физико-химическое состояние Земли. В течение длительного времени она аккумулировалась в геологической среде и по существу определила ее современный облик, а также создала сегодняшнее *геологическое* пространство (*геофизические и геохимические поля*), отражающее физико-химические и экологические свойства среды [1].

Основные факторы, которые входят в характеристику экологических свойств экосистем, зависят не только от *естественно-природных*, но, в первую очередь, от *аномальных* условий, которые с индустриальным развитием сильно изменяются. Некоторые свойства формируются под влиянием эволюционно развивающихся (фоновых) природных процессов, а на формирование других оказывают влияние аномальные (экстремальные) процессы природного и природно-техногенного происхождения. В современных условиях развитие *биосферы* проходит под активным влиянием антропогенного фактора, что приводит к формированию целых *геоэкологических комплексов*, которые характеризуются многообразием экологических функций геосфер Земли и определяют условия не только жизнедеятельности человека, но и существование биоты [2]. Движущей силой процессов, влияющих на стабильность и устойчивость составляющих экологических функций нашей планеты, а также их способность к саморегуляции и самовосстановлению, являются геофизические поля, оказывающие большое влияние, как на живую природу, так и на самого человека.

Исследование параметров и масштабов воздействия на среду обитания человека, выявление физических условий, благоприятных для жизни людей и других живых организмов является основной целью раздела экологической геологии – *экологической геофизики*, предметом изучения которой являются

природные (естественные) и техногенные (искусственные) физические поля, их изменения и степень воздействия на биоту [3].

В рамках экологической геологии по полноте описания, степени проработки и возможности использования геофизические поля сильно отличаются друг от друга [2]. Наиболее полно представлены и описаны электромагнитная, геохимическая, радиационная и тепловая геофизические экологические функции литосферы, в составе которых выделяется «фоновая» (природная) и «аномальная» (в большей части антропогенная) составляющие. При решении экологических задач проводится сравнение этих составляющих с использованием системы числовых параметров характеризующих текущего «энергетического» состояния поля в пункте наблюдения, на основе которой оценивается экологическая обстановка и условия жизнедеятельности населения.

Сегодня сейсмическое поле является не полностью проработанной геофизической экологической функцией литосферы. Это связано с тем, что до конца прошлого столетия сейсмический шум, отражающий вариации сейсмического поля, рассматривался практически как помеха при получении полезной информации о геологическом строении изучаемой территории по записям взрывов или землетрясений. Отчасти это было оправдано, тем, что сейсмометрический канал оборудования имел очень высокий уровень собственного шума, поэтому ни о какой «природной» составляющей сейсмического поля говорить не приходилось. Хотя идея о возможности использования микросейсм для изучения строения Земли высказана в начале XX века Б.Б. Голицыным. Полученные за следующие 70 лет исследований результаты, подтвердили возможность существования “поля микросейсмических колебаний” тесно связанного “со строением геологической среды” [4].

Только начиная с 90-х годов XX века, широкое развитие и внедрение цифровой техники и высококачественной электроники, существенно увеличившие чувствительность и разрешающую способности

сейсмологического оборудования, и сделавшие его более компактным и доступным по стоимости, позволило регистрировать на новом качественном уровне низкоамплитудные (микросейсмические) колебания сейсмического поля. Это послужило толчком развития пассивных методов сейсморазведки, использующих запись микросейсмического шума для решения прикладных геофизических задач. Их активное развитие обусловлено основными преимуществами этих методов: экологической чистотой; меньшими затратами ресурсов; возможностью изучения геологической среды в её невозмущенном состоянии.

Сегодня они используются для решения широкого круга задач: поиск залежей углеводородного сырья; изучение неоднородных геологических структур; фундаментальных исследований геосреды; разработка методов прогноза возможных катастроф; развитие новых методов поиска, разведки и контроля при разработке полезных ископаемых; микросейсмического районирования территорий; краткосрочного прогноза землетрясений; прогноза локальных геодинамических рисков территории [5-12]. Несмотря на их активное использование, фундаментальные основы механизма генерации и природа фонового микросейсмического поля, степень отражения в нем особенностей геологического строения и сейсмической эмиссии на сегодняшний день не достаточно изучены.

Новый этап в развитии сейсмологических наблюдений совпал с моментом зарождения и становления экологической геологии, поэтому сейсмическое поле там представлено известными на тот момент видами: производственной вибрацией, определяющей антропогенную составляющую; землетрясениями, отвечающими за его природную часть. Использование нового прецизионного широкополосного сейсмологического оборудования привело к возможности регистрации фоновых микроколебаний и изменению терминологии. Теперь вместо сейсмического шума стали использовать термин «микросейсмический шум», подчеркивая приставкой «микро», что записи получены на цифровом, высокочувствительном, прецизионном комплексе

(датчик-регистратор) сейсмологического оборудования. Однако с точки зрения экологической геологии при использовании сейсмических записей полученных оборудованием высокого класса в принципе приставку «микро» для дальнейшего описания можно опустить, чтобы не вводить дополнительных терминов, которые не являются принципиальными для экологического применения.

Таким образом, отсутствие фундаментальных знаний о реальных источниках и механизмах генерации фонового сейсмического поля, содержащего «полезную» геолого-геофизическую информацию, существенно ограничивает его полноценное использование не только для получения информации о геологической среде, но и эффективное использование сейсмического поля в экологической геологии наравне с магнитным, электрическим и гравитационным. Известно, что в основе современной модели строения Земли лежат результаты сейсмологического мониторинга землетрясений, и поэтому изучение особенностей фонового сейсмического поля и определение его свойств имеет не только прикладное, но и фундаментальное значение.

1 Фоновое сейсмическое поле

Успешное применение методов пассивной сейсморазведки подтверждает сделанные ранее предположения, о том, что сейсмический шум на поверхности Земли кроме сейсмических помех различного генезиса должен содержать широкополосный процесс, в котором записана «полезная» геолого-геофизическая информация. Поэтому, можно предположить, что фоновое сейсмическое поле отражает геологическое строение и геодинамическое состояние геологической среды в пункте наблюдения. В связи с отсутствием «понимания» его природы в рамках сегодняшних представлений в геологии и геофизики можно использовать простую для понимания «физическую» модель. С точки зрения физики *фоновое сейсмическое поле (ФСП) можно представить колебаниями, возникающими в структурах геологической среды,*

при преобразовании поступающей в неё эндогенной энергии (функционально напоминает принцип действия «музыкального органа»).

Такая «физическая» формулировка позволяет на начальном этапе уйти от необходимости объяснения источников «этой энергии», т.к. при анализе реальных записей это не так важно. При этом однозначно понятно, что сейсмическое поле в пункте наблюдения создает сложный волновой процесс – **сейсмический шум (СШ)**, являющийся суперпозицией колебаний от большого числа природных и антропогенных источников, который регистрируется сейсмологическим оборудованием. К антропогенным источникам СШ относятся: движение транспортных средств; взрывы в карьерах; работа трансформаторов, агрегатов и мощных моторов, т.е. источники, возникающие в процессе хозяйственной деятельности человека. В зависимости от удаления антропогенного источника от пункта наблюдения и его мощности они создают разные по уровню воздействия.

На близких расстояниях они записываются в виде «*помех*» (амплитуда записи на непродолжительное время повышается более чем в два раза). Суперпозиция воздействий от большого числа удаленных источников создаёт плавное изменение уровня в течение суток. Такое воздействие называется «*техногенная нагрузка*». Она отражает «жизнь» близко расположенной производственной и/или социальной инфраструктуры и характеризуется суточной цикличностью.

К природным источникам СШ можно отнести землетрясения (создающие воздействия аналогичные помехам), волнения на акваториях океанов и морей («*сейсмические бури*» - аналог «*техногенной нагрузки*» длительностью до нескольких суток), а также фоновый шум Земли – **сейсмический фон (СФ)**, в котором, согласно предположению, должны отражаться особенности геологического строения и геодинамической ситуации в пункте наблюдения.

Теоретическая возможность существования сейсмического фона, с той же физической точки зрения, может быть объяснена просто: собственными

колебаниями обладает любое тело, если его температура выше абсолютного нуля. Это дополняет приведенное выше определение ФСП. В результате их объединения получается, что фоновое сейсмическое поле на поверхности образуется в результате *суперпозиции собственных колебаний геологических структур, возникающих и поддерживаемых поступающей эндогенной энергией из глубинных горизонтов Земли, находящихся при разных РТ-условиях (Давление-Температура), определяющих связь глубины залегания структуры с периодом создаваемых ей собственных колебаний.*

2 Отражение в сейсмическом поле структурно-геологических особенностей ВКМ

Для иллюстрации существования фонового сейсмического поля на территории Воронежского кристаллического массива (ВКМ) рассмотрим несколько важных результатов, полученных сотрудниками совместной лабораторией глубинного строения, геодинамики и сейсмического мониторинга им. проф. А.П. Таркова ВГУ и ФИЦ ЕГС РАН. За 25 лет исследований собран богатейший фактический материал по сейсмическому шуму в различных геологических структурах и геодинамических ситуациях на территории ВКМ.

2.1 Числовые характеристики сейсмического шума

Регистрируемое в пункте наблюдения сейсмической станцией поле представляет собой запись трёх взаимно ортогональных компонент сейсмического шума, являющейся разложением скорости движения грунта по трем направлениям Z-вертикальный (вверх-вниз) и два горизонтальных NS - (север-юг) и EW - (восток-запад). На рис. 1а приведен пример 30-ти минутного фрагмента трехкомпонентной записи на сейсмостанции «Сторожевое» сейсмического шума максимально свободного от помех, записанного широкополосными сейсмометрами СМЗ-ОС с частотой дискретизации 20 Отсч/с.

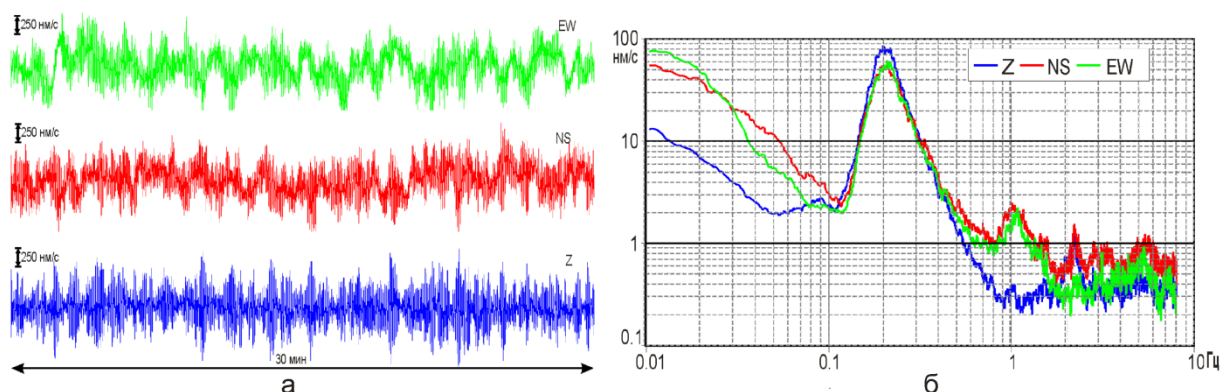


Рис. 1. Пример 3-х компонентной широкополосной записи сейсмического шума (а) с минимальным количеством помех и его сглаженный амплитудный спектр (б) в пункте наблюдения «Сторожевое»

На рис. 1б представлены частотные характеристики компонент сейсмического шума – сглаженные мгновенные амплитудные спектры. Для числовой характеристики сейсмического шума во временной области обычно используется его уровень, т.е. средняя амплитуда центрированной записи на выбранном интервале и в выбранном частотном диапазоне.

$$U\tau = \overline{|Z(t) - M\tau|}, \quad (1)$$

где $Z(t)$ – исходная или фильтрованная запись вертикальной (Z) компоненты сейсмического шума, а $M\tau$ – среднее значение $Z(t)$ на интервале τ . Уровень наиболее объективно отражает изменения сейсмического шума во временной области.

В частотной области аналогичную уровню характеристику представляет мгновенный сглаженный амплитудный спектр Фурье (рис.1б). По сути, спектр является набором амплитуд, характеризующий на выбранном фрагменте записи уровень каждой отдельной гармоники. Этот более информативный набор числовых значений сейсмического шума позволяет получить общее представление о частотном составе исследуемого процесса, при этом в отличие от спектра мощности обладает аддитивным свойством, т.е. запись суммы двух сигналов во временной области имеет амплитудный спектр равный сумме амплитудных спектров этих сигналов.

2.2 Отражение геологических структур во временной области

В статье [13], опубликованной в Докладах Академии наук, приводится результат сравнения уровня сейсмического шума максимально свободного от помех в двух диапазонах частот $0.7-1.4 \text{ Гц}$ и $1.0-8.0 \text{ Гц}$ для трех крупномасштабных структур ВКМ: Курский мегаблок (КМ), Хоперский мегаблок (ХМ) и Лосевская шовной зоны (ЛШЗ). В каждой из этих структур было исследовано по 5 пунктов наблюдений (рис. 2а). Наблюдения в каждом пункте проводились в течение 14 дней. Для коррекции вариаций уровня сейсмического шума использовалось приведенное значение ночного уровня вертикальной составляющей относительно базовой станции «Сторожевое», которая работала на всех расстановках.

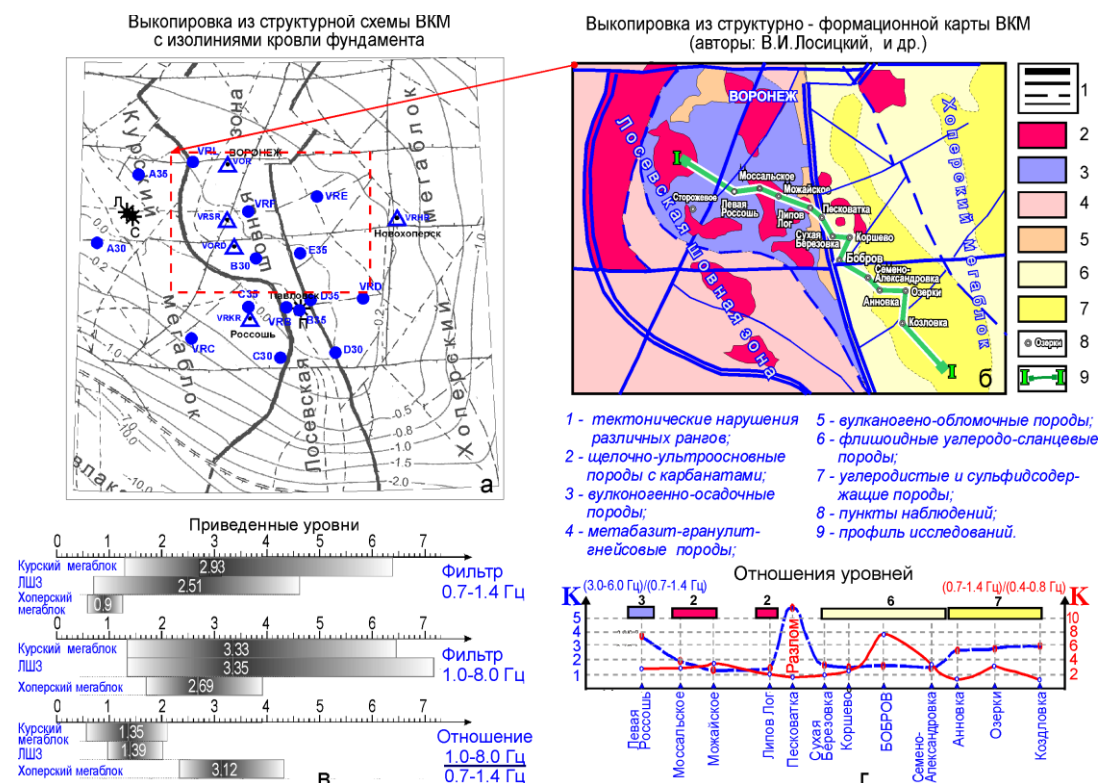


Рис. 2. Схемы расположения пунктов наблюдений при проведении площадных (а) и профильных (б) работ, приведенные средние уровни ночного сейсмического шума в крупных структурах ВКМ в диапазонах частот $0.7 - 1.4 \text{ Гц}$ и $1.0-0.8 \text{ Гц}$ и их отношений (в), изменение значения отношения уровней фильтрованных записей ночного сейсмического шума вдоль профиля пересекающего Лосевско-Мамонский разлом (г)

Второй задачей было изучение отражения в характеристиках сейсмического шума особенностей геологического строения докембрийского фундамента. Для этого был выбран профиль, расположенный в двух структурах ВКМ и пересекающий Лосевско-Мамонский разлом первого ранга (рис. 2б). По полученным в ходе полевых работ данным рассматривались нормированные среднесуточные уровни сейсмического шума в четырех октавных частотных диапазонах: $0.4-0.8 \text{ Гц}$, $0.7-1.4 \text{ Гц}$, $1.5-3.0 \text{ Гц}$ и $3.0-6.0 \text{ Гц}$. В качестве «базы» для коррекции вариаций использовались уровни одномоментных записей сейсмической станции «Сторожевое». Результаты данного исследования опубликованы в коллективной монографии под редакцией Н.В. Шаров, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукин [14].

В результате выполненных исследований установлено, что крупномасштабные геологические структуры ВКМ находят отражение в уровнях сейсмического шума, особенно в диапазоне $0.7-1.4 \text{ Гц}$ которые согласуются с представлением о ЛШЗ как зоне субдукции, в верхней части которой располагаются породы Курского, а внизу Хоперского мегаблоков. В диапазоне частот $1.0-8.0 \text{ Гц}$ отсутствие принципиальных различий может, например, говорить о том, что во время формирования верхней части геологической среды на территории структур ВКМ проходило при одинаковых геологических условиях. Самый лучший результат разделения геологических структур ВКМ виден в отношениях, которые позволили однозначно разделить КМ и ХМ.

Результаты профильного исследования показали, что сами изменения уровней в этих частотных диапазонах не коррелируют ни с какими геофизическими параметрами геологической среды, а вот отдельные отношения уровней сейсмического шума можно логично проинтерпретировать. Первое отношение $(3.0-6.0 \text{ Гц})/(0.7-1.4 \text{ Гц})$ хорошо

согласуется с петрофизическими свойствами пород кровли докембрийского фундамента, а также позволяет гарантировано выделить пункт наблюдения, расположенный в зоне действия структурного элемента ВКМ Лосевско-Мамонского разлома (рис. 2г). Второе отношение $(0.7-1.4 \text{ Гц})/(0.4-0.8 \text{ Гц})$ хорошо коррелируется с уровнем техногенной нагрузки в населенных пунктах, где размещалось оборудование. Его максимум соответствует г. Боброву, являющемуся районным центром. Интересным является то, что высокая техногенная нагрузка в этом пункте не помешала правильной оценки петрофизической характеристики породы кровли докембрийского фундамента. Это показывает достаточно широкий диапазон возможностей при использовании характеристик сейсмического поля во временной области.

2.3 Отражение геологических структур в частотной области

Теперь рассмотрим, как в частотной области соотносятся амплитудные спектры пунктов наблюдений расположенных в разных структурах территории ВКМ. Для этого, используя фильтрацию в двух диапазонах частот $0.7-1.4 \text{ Гц}$ и $1.0-8.0 \text{ Гц}$, усредним полученные амплитудные спектры пунктов (см. рис. 2а) расположенных в одинаковых структурах и отдельно усредним амплитудные спектры пунктов наблюдений расположенных вблизи Лосевско-Мамонского разлома. На рис.3 приведены осредненные амплитудные спектры пунктов наблюдений расположенных в зоне разлома и в пределах структур ВКМ. Как видно из рис.3 спектральные составы записей в различных структурах имеют значимые, хорошо интерпретируемые отличия. Так зона Лосевско-Мамонского разлома выделяется во всех диапазонах частот более низкими значениями спектральных амплитуд [14].

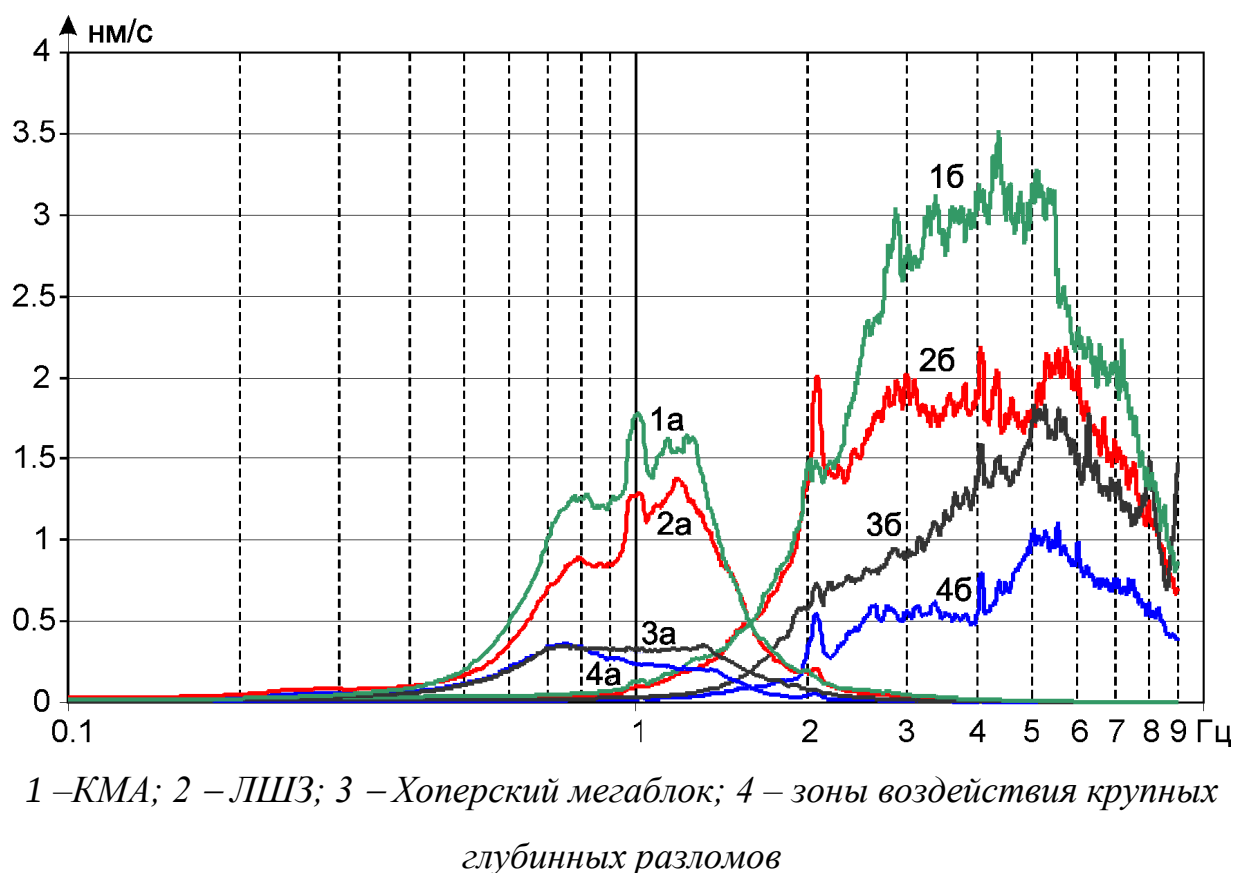


Рис. 3. Осредненные амплитудно-частотные спектры вертикальной составляющей микросейсмического шума (б) в двух диапазонах частот 0.7-1.4 Гц (а) и 2.0-8.0 Гц (б) в пределах структур ВКМ

Рассматривая амплитудные спектры тех же диапазонов частот на предмет отражения в них влияния зоны разломов Лосевско-Мамонского и Новохоперского, выберем пункты наблюдения расположенные на удалениях до 50 км от них, и находящиеся в двух структурах ЛШЗ и Хоперском мегаблоке. Используем дополнительно данные трех пунктов наблюдений расположенных в Хоперском мегаблоке вблизи Новохоперского разлома. Полученные амплитудные спектры приведены на рис. 4.

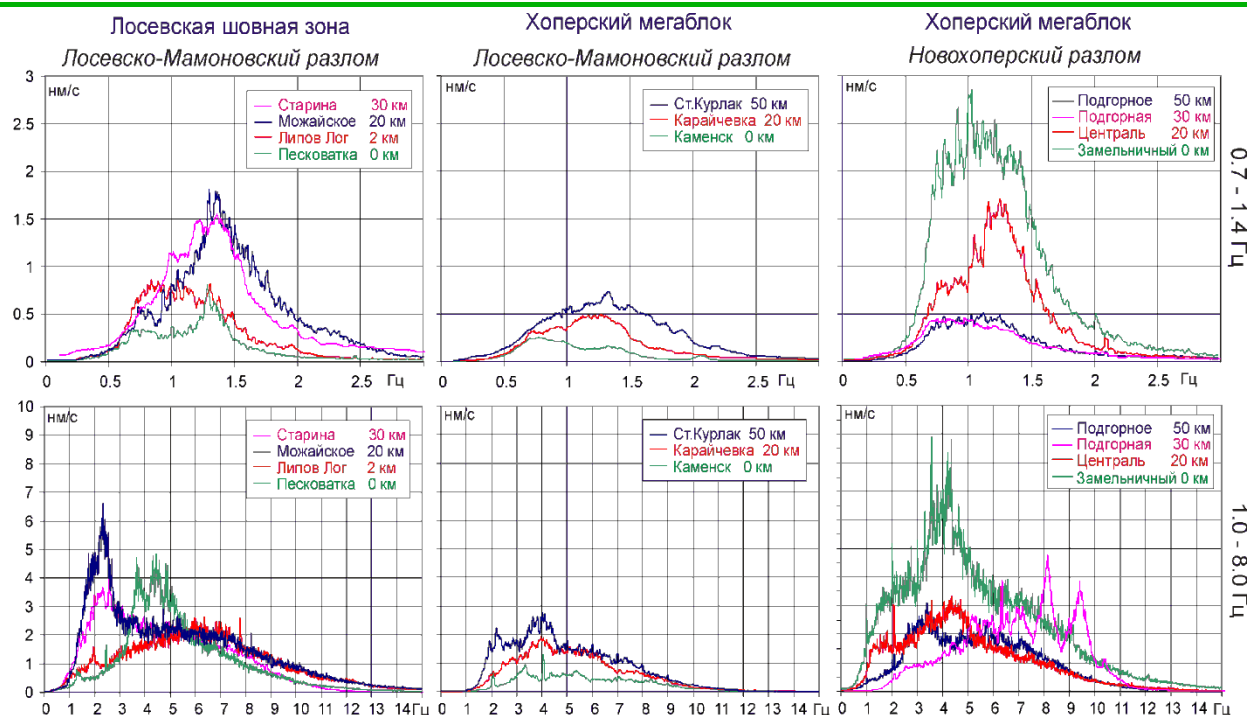


Рис. 4. Амплитудные спектры вертикальной составляющей сейсмического шума в двух диапазонах частот 0.7-1.4 Гц (а) и 1.0-8.0 Гц в пунктах наблюдений расположенных на разных удалениях от Лосевско-Мамонского и Новохоперского разломов сгруппированные по структурам ВКМ в которых они расположены

Как видно из рис. 4 лучше всего разломы отражаются в диапазоне частот 0.7-1.4 Гц. При этом зона влияния обоих разломов составляет примерно 20 км. Однако их поведение в сейсмическом шуме диаметрально противоположно. Лосевско-Мамонский разлом, находящийся в состоянии сжатия, проявляется низкими значениями амплитуд, а Новохоперский разлом, находящийся в состоянии растяжения, характеризуется повышенными значениями спектральных амплитуд. Это подтверждает влияние на сейсмический шум геодинамического состояния разлома. В пунктах наблюдений удаленных от разломов на 30 и 50 км спектральные амплитуды в Хоперском мегаблоке по амплитуде не имеют существенных различий, т.е. влияние разломов полностью отсутствует.

В связи с отражением в сейсмическом шуме геологических структур региона рассмотрим возможность их моделирования. Используя осредненные амплитудные спектры для пунктов наблюдений (см. рис. 2а) были проанализированы пространственные распределения значений спектральных амплитуд в узких частотных диапазонах, приведенные к значениям на станции «Сторожевое». На рис. 5 представлен результат моделирования распределения приведенных значений в диапазоне частот 0.6-0.7 Гц, совмещенный с фрагментом структурной схемы ВКМ [14].

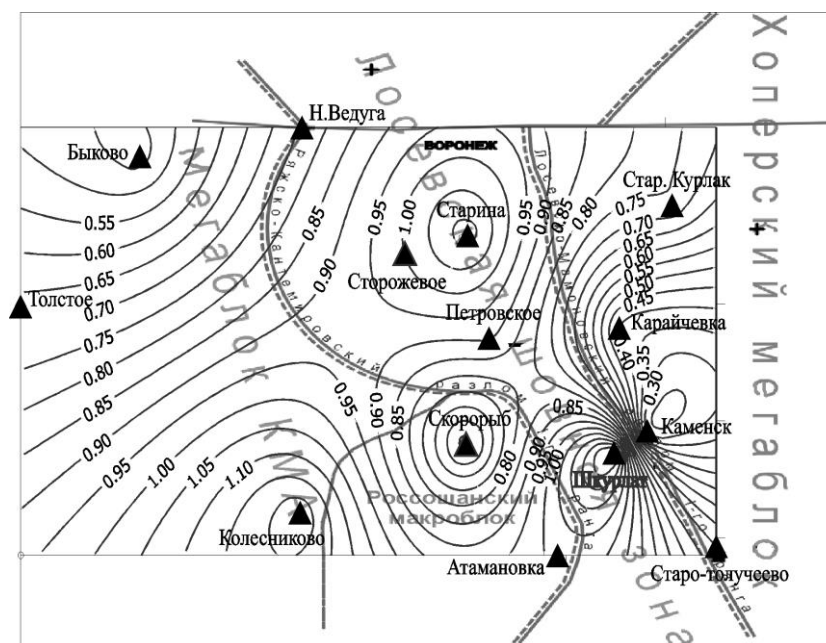


Рис. 5. Результат пространственного моделирования распределения значений сейсмического шума на территории ВКМ в диапазоне частот 0.6-0.7 Гц на фрагменте структурной схемы ВКМ [14]

Не смотря на малое число пунктов наблюдений, результат пространственного моделирования хорошо отражает положение Лосевско-Мамонского разлома и Россошанского макроблока, который явно выделяется на фоне Курского мегаблока (на рис 5 - КМА) и имеет видимую границу с ЛШЗ. Она соответствует Рязско-Кантимировскому разлому. Его северная часть слабо выделяется в сейсмическом поле, что возможно связано с

отсутствием возле него пунктов наблюдений или отражает возможное субдукционное строение этой части территории, представленной породами Курского мегаблока. Для других диапазонов частот полученные модели в меньшей степени согласуются со структурной схемой ВКМ. В принципе это не говорит об отсутствии связи частоты с глубиной, т.к., возможно, что только для глубин соответствующих диапазону частот 0.6-0.7 Гц данная структурная схема является актуальной, т.е. на ней присутствуют все вертикальные границы территории. Также именно в этом частотном диапазоне полностью отсутствуют антропогенные воздействия (техногенная нагрузка) и природные (сейсмические бури), которые теоретически могли оказать влияния на результат, получаемый в других частотных диапазонах.

Результаты, полученные при выполнении исследований сейсмического шума, показывают, что сейсмическое поле на территории ВКМ содержит информацию о её основных структурных элементах, а также отражает особенности геологического строения их докембрийского фундамента и геодинамическую позицию разломных зон. Это может служить объективным подтверждением существования фонового сейсмического поля на территории ВКМ, знание свойств которого позволит создать методические основы его использования для решения широкого спектра эколого-геофизических задач.

3. Свойства фонового сейсмического поля на территории ВКМ

Приведенные выше примеры показывают возможность успешного использования характеристик записей сейсмического шума, как во временной, так и в частотной области. В большинстве методов пассивной сейсморазведки используют амплитудно-частотные характеристики сейсмического шума (осредненный амплитудный или спектр мощности). Они получаются статистической обработкой интервала записи с использованием амплитудных спектров Фурье. Анализ амплитудных спектров пунктов наблюдений на территории ВКМ выявил их важную особенность, связанную со средним

значением спектральных амплитуд гармоник и их среднеквадратическим отклонением. Для иллюстрации данной особенности рассмотрим непрерывную 4.5 часовую максимально свободную от помех трехкомпонентную запись сейсмического шума (рис. 6а).

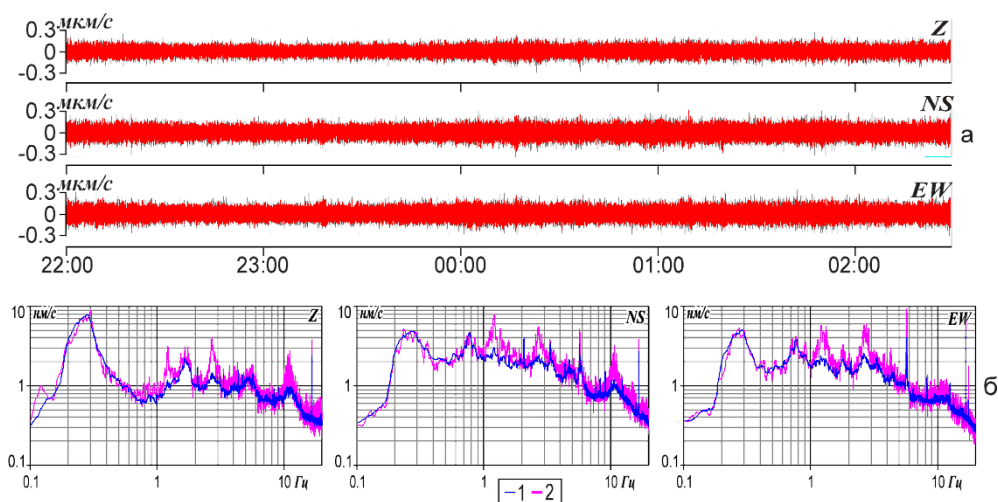


Рис. 6. Трехкомпонентная запись сейсмического шума с минимальным уровнем помех (а) и их статистические характеристики (N=108): среднее значение (1б) и четырех кратное среднеквадратическое отклонение (2б) для амплитуд гармоник

Для получения осредненного амплитудного спектра трёхкомпонентной записи разделим её на 108 перекрывающихся (50%) фрагментов длительностью 5 мин. Для каждого фрагмента (окна) рассчитаем амплитудный спектр, используя преобразование Фурье с весовым окном Хемминга и сглаживанием спектральных амплитуд по семи значениям. По каждой частоте вычислим среднее значение и среднеквадратичное отклонение. Полученные частотные зависимости средней амплитуды (СА) и среднеквадратического отклонения (СКО) записи сейсмического шума имеют коэффициент корреляции выше 0.9 по любому из каналов, что говорит о сильной связи параметров прямого характера. Используя 4-х кратное увеличение СКО, наложим его на СА.

Как видно из рис. 6б их хорошее совпадение наблюдается в отдельных диапазонах частот. Однако присутствуют диапазоны частот, где они не совпадают. Причем $4 \cdot \text{СКО}$ там, всегда выше СА , что возможно связано с присутствием в этом частотном диапазоне аддитивных составляющих помех (любого генезиса). Тогда предположив, что если уровень помех на записи снизится до нуля, то распределение значений коэффициента вариации ($K_{\text{var}} = \text{СКО}/\text{СА} \cdot 100\%$) по всем частотам будет стремиться к одномодальному (мода = 25%). Это однозначно показывает присутствие в сейсмическом шуме непрерывного, однородного ($K_{\text{var}} < 33\%$), широкополосного процесса (во всем диапазоне частот $K_{\text{var}} = \text{const}$) – **сейсмического фона**, который может характеризовать фоновое микросейсмическое поле в пункте наблюдения. Установлена также интересная особенность: *данное свойство (зависимость) сохраняется для набора того же количества отдельных фрагментов записи с минимальным уровнем помех, выбранных в ночное время даже в разные сутки*. Это дополнительно характеризует сейсмический фон в пункте наблюдения на территории ВКМ как квазистационарный процесс.

Таким образом, фоновое сейсмическое поле на территории Воронежского кристаллического массива создает в пунктах наблюдения широкополосный, непрерывный, однородный квазистационарный сейсмический процесс – микросейсмический фон, который можно считать Гауссовым белым шумом (ГБШ).

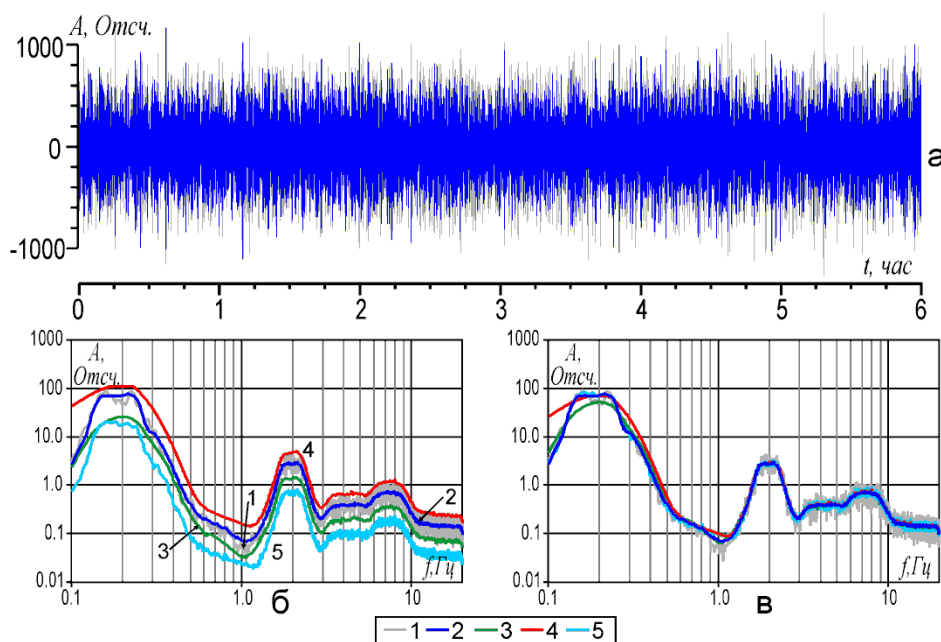
4. Оценки амплитудного спектра сейсмического фона

Основной проблемой при оценке характеристики сейсмического фона на платформенной территории является высокий уровень помех, в несколько раз превышающий амплитуды фоновых колебаний. Использование осредненного амплитудного спектра СШ в качестве характеристики СФ, полученной стандартным статистическим методом, в данном случае, не дают надежного результата. Этот способ применим для оценки характеристик полезного сигнала на фоне действия шума, обладающего, обычно, свойством ГБШ. Так

как в этом случае «сигналом» является именно ГБШ с относительно низкими амплитудами, то задача состоит в том, чтобы получить наиболее близкую оценку его амплитудного спектра в присутствии на записи любых по амплитуде помех ограниченных по длительности (меньше анализируемого интервала записи). Использование для расчета селекции (выбора) фрагментов с минимальным уровнем помех также даёт результат, который сильно зависит от их уровня и количества, т.е. данный способ не является надёжным для оценки характеристики СФ, что вносит искажения в его последующую геолого-геофизическую интерпретацию. Даже если потратить большее расчетного времени на использования вместо среднего значения медиану или моду, то этим кардинально проблему степени достоверности оценки не решить. Для получения объективной оценки сейсмического фона в пункте наблюдения необходимо создать инструментарий, позволяющий получать её максимально близкой к осредненному амплитудному спектру сейсмического фона без помех не используя предварительную селекцию фрагментов.

Для этого необходимо сначала найти варианты оценок осредненного сейсмического фона без присутствия помех. Реальные записи, даже самые тихие, не могут быть использованы, т.к. всегда находится источник «помехи» даже в Антарктиде. Поэтому используем моделирование записи сейсмического фона с помощью Гауссова белого шума, которая получена в результате суммирования фильтрованных записей (50 Отсч/с) генератора случайных чисел с равномерным распределением и разными амплитудами, с помощью которых моделировалась частотная характеристика вертикальной составляющей СФ. Для фильтрации использовались октавные фильтры, диапазоны частот которых распределены равномерно по всей рабочей полосе частот (0.1-20.0 Гц) с 50% перекрытием. Для моделирования использовался процессор обработки сигналов (ПОС) программы WSG [15, 16]. На основе полученных моделей записи сейсмического фона, рассмотрено несколько способов получения оценки осредненного амплитудного спектра.

На рис. 7а представлена запись ГБШ, моделирующая вертикальную составляющую сейсмического фона (без помех) на выбранном интервале. Разделим его на статистически значимое число фрагментов равной длительности с 50% перекрытием. Рассчитаем для каждого фрагмента амплитудный спектр с использованием преобразования Фурье и весовым окном Хемминга с коррекцией потери площади (*1.85) и сглаживанием его по 7-ми значениям спектральных амплитуд (осреднение спектральной амплитуды с 3-мя до и 3-мя после). Представляя амплитуду каждой гармоники как случайную величину, изменяющуюся от одного к другому фрагменту, рассчитаем для них среднее, минимальное и максимальное значение, а также среднеквадратическое отклонение.



1 – Амплитудный спектр 5-ти минутного фрагмента; Амплитудные спектры, полученные по 100 5-ти минутным фрагментам с 50% перекрытием амплитудным спектрам: 2 – осредненный; 3 – минимальный; 4 – максимальный; 5 – среднеквадратический.

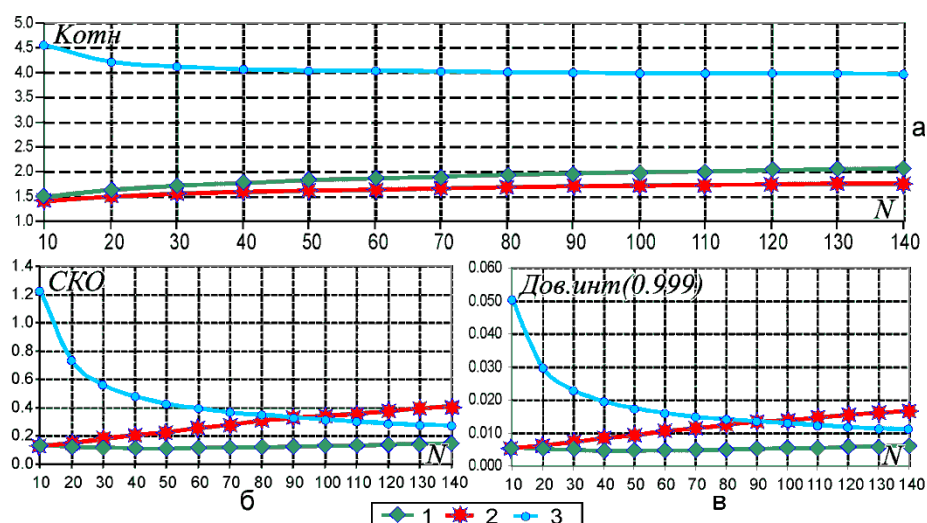
**Рис. 7. Результат моделирования 6-ти часовой записи
микросейсмического фона (а), сравнение амплитудных спектров
статистических характеристик с мгновенным и осредненным (б) и
наличие «линейной» связи между ними (в)**

В результате получим ранжированные по частоте «наборы» (ряды) средних, максимальных, минимальных и среднеквадратических значений спектральных амплитуд гармоник. Оценим осредненный амплитудный спектр, в качестве которого используем ряд со средними значениями. Полученные ряды максимальных, минимальных и среднеквадратических значений будем называть максимальным, минимальным и среднеквадратическим амплитудным спектром соответственно.

На рис. 7б представлены амплитудные спектры статистических характеристик, которые получены по 100 5-ти минутным фрагментам. Для расчета среднеквадратического амплитудного спектра для каждой гармоники использовалась формула разности моментов, которая хорошо адаптируется под последовательный алгоритм расчета, который также применялся для расчета максимального и минимального амплитудного спектра. Для этого на каждом шаге попарно проводилось сравнение амплитуд гармоник между амплитудным спектром нового фрагмента с минимальным и максимальным спектром предыдущего шага. В результате выбора минимальных и максимальных амплитуд гармоник получались новые минимальные и максимальные ряды, которые после сглаживания по 7 значениям (осреднение с 3-мя до и 3-мя после спектральными амплитудами) становились минимальным и максимальным амплитудным спектром этого шага. На рис. 6в показано, что рассматриваемые амплитудные спектры можно использовать в качестве «оценок» осредненного амплитудного спектра ГБШ при использовании простого коэффициента преобразования, значение которого зависит от числа использованных для расчета фрагментов.

Для определения точности получаемых «оценок» и их зависимости от числа фрагментов вычислим отношения амплитудных спектров

статистических характеристик оценок с осредненным спектром (больших значения делим на меньшие) для разного числа фрагментов. Полученные по каждой частоте отношения усредним в диапазоне частот 0.1-20 Гц и рассчитаем для среднего коэффициента преобразования среднеквадратическое отклонение (СКО) и доверительный интервал с уровнем доверия 0.999. На рис. 8а представлены зависимости средних значений отношений от числа N используемых для расчета фрагментов. Зависимость среднеквадратического отклонения полученных отношений от числа фрагментов представлена на рис. 8б. При этом доверительный интервал, приведенный на рис. 8в более чем в 20 раз меньше СКО.



*Отношения амплитудных спектров: 1 – осредненный к минимальному;
2 – максимальный к осредненному; 3 – осредненный к среднеквадратическому*

Рис. 8. Зависимости масштабирующих коэффициентов для оценки осредненного амплитудного спектра модели сейсмического фона (а), их статистических оценок: среднеквадратического отклонения (б) и доверительного интервала (в) от числа фрагментов используемых для расчета

Как видно из рис. 8, начиная с числа фрагментов 70 полученные зависимости коэффициентов преобразования (рис. 8а) становятся практически линейными, а график доверительного интервала коэффициента минимального амплитудного спектра (рис. 8в) при этом числе фрагментов имеет небольшой минимум. То есть для получения максимально близкой «оценки» интервал исследуемой записи достаточно разделить на 70 и более фрагментов, понимая, что увеличение числа фрагментов не приносит существенного выигрыша в точности, а только удлиняет время обработки. Поэтому для практического использования оптимальное число фрагментов может находиться в пределах 70-100.

Таким образом, для оценки осредненного амплитудного спектра ГБШ на выбранном интервале, можно использовать любой из вариантов рассмотренных выше оценок с соответствующим числом фрагментов коэффициентом преобразования, и даже сглаженный мгновенный амплитудный спектр любого из фрагментов. Обоснованность использования ГБШ в качестве модели сейсмического фона подтверждает сравнение коэффициента преобразования для среднеквадратической оценки по смоделированной записи ГБШ с соотношением, полученным по реальной записи (см. рис. 6).

5. Использование оценок сейсмического фона

В случае анализа интервала с неизвестной записью, при совпадении всех этих оценок с осредненным амплитудным спектром можно однозначно утверждать, что эта запись является ГБШ. Присутствие на интервале записи помехи (реальная запись) в ограниченном диапазоне частот, благодаря

аддитивному свойству амплитудного спектра, приводит к расхождению значений «Оценок» на этих частотах. При этом степень отличия зависит от интенсивности «помехи», её амплитудной стабильности и повторяемости на интервале записи. Тогда различия, возникающие в «Оценках», можно использовать для получения числовых характеристик «помех» на исследуемом интервале записи. Для более глубокого понимания сути получаемых оценок рассмотрим схему алгоритма расчета этих оценок на интервале реальной записи (рис. 9).

На рис. 9 представлен параллельный вариант алгоритма расчета «Оценок». Его схема наглядно представляет их суть, но менее удобна для практической реализации, в отличие от последовательного алгоритма, описанного выше. Из схемы хорошо видно, что оценка MIN включает минимальные значения амплитуд гармоник из всех фрагментов, т.е. из суммы тех источников, которые на исследуемом интервале присутствуют постоянно, в отличие от «помех». Такими источниками могут быть сейсмический фон, техногенная нагрузка и сейсмические бури. Тогда чтобы получить характеристику только сейсмического фона необходимо выбрать интервал времени, когда техногенная нагрузка и сейсмическая буря будут минимальными. Если для техногенной нагрузки ночное время является лучшим, то с сейсмической бурей, длящейся несколько суток не так всё предсказуемо. Хотя за счет её ограниченного частотного состава ($0.1-0.4 \text{ Гц}$) она не оказывает воздействия в частотном диапазоне выше 0.4 Гц , который обычно используется для геолого-геофизических исследований.

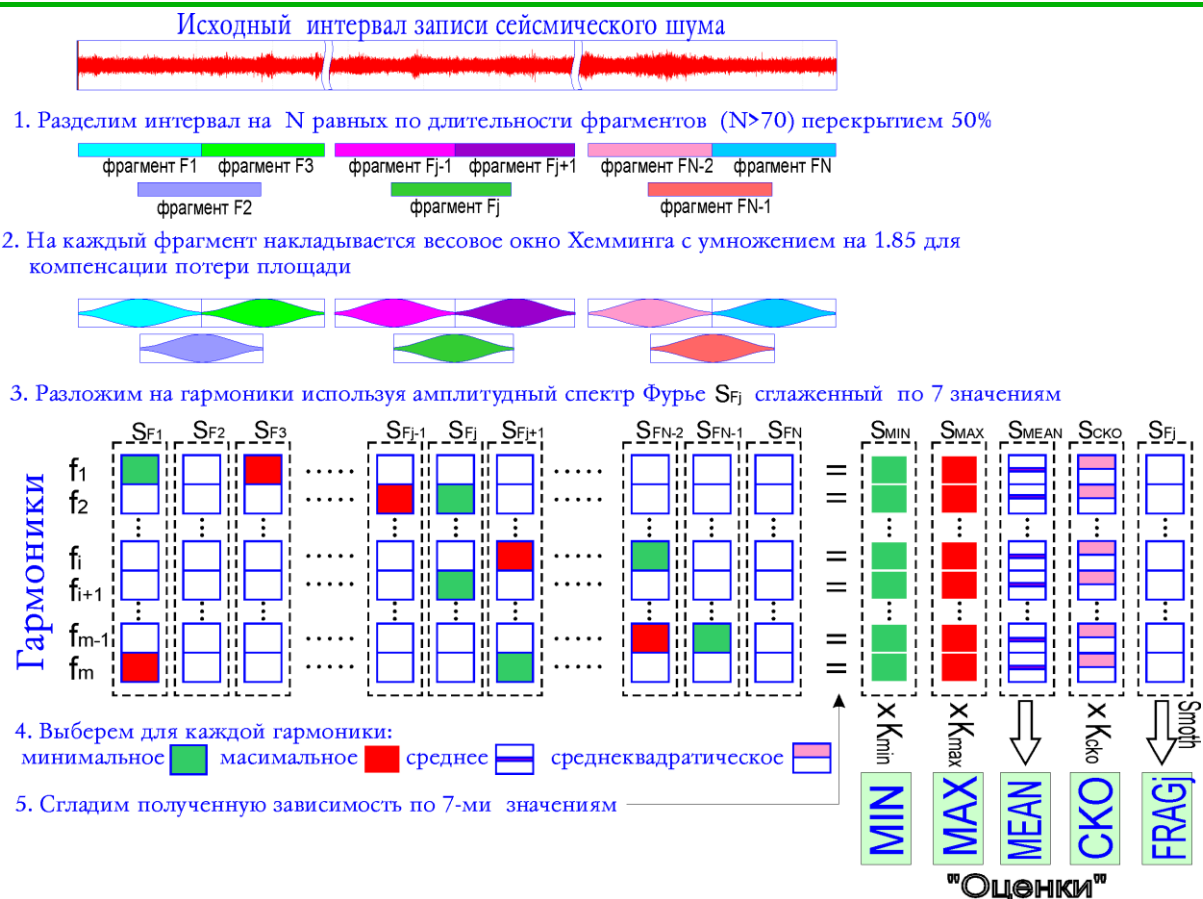


Рис. 9. Алгоритм вычисления «Оценок» для реальной записи

Таким образом, для получения наиболее точной характеристики сейсмического фона в пункте наблюдения необходимо использовать ночное время и отсутствие вблизи предприятия непрерывного цикла, которое не дает техногенной нагрузке снижаться ночью до «нулевого» уровня. Не смотря на это, оценка MIN может быть «полезной», так как характеризует стационарную составляющую сейсмической записи. Остальные «Оценки» включают её непостоянные составляющие, содержащие, как «помехи», так и изменяющаяся часть техногенной нагрузки и сейсмической бури. Используя терминологию экологической геофизики стационарную составляющую можно отнести к «нормальной» составляющей сейсмического поля, а нестационарную к «аномальной». Это позволят ввести в экологическую геофизику новый структурный элемент фоновое (стационарное) сейсмическое поле,

расширяющее возможности эколого-геофизической функции сейсмического поля, приближая его по значимости к хорошо проработанным функциям магнитного, электрического и гравитационного полей.

Теперь рассмотрим возможности разработанных «Оценок» на примере двух 6 часовых интервалов записей вертикальных составляющих сейсмической станции «Воронеж» (VORR): ночь-утро (рис. 10а) и день-вечер (рис. 10б). Для лучшей наглядности и понимания сравним оценки, полученные на разных длительностях интервалов, включающих 100 и 144 фрагментов. При этом особенностью является то, что первый интервал полностью содержится во втором. На рассматриваемых записях рис. 9 видно различие уровня постоянной составляющей, которая ночью (а) существенно меньше, чем днем (б). При этом амплитуды непостоянных составляющих обеих записей сопоставимы, но «нестабильность» воздействия ночной записи выглядит более сильным, чем дневной.

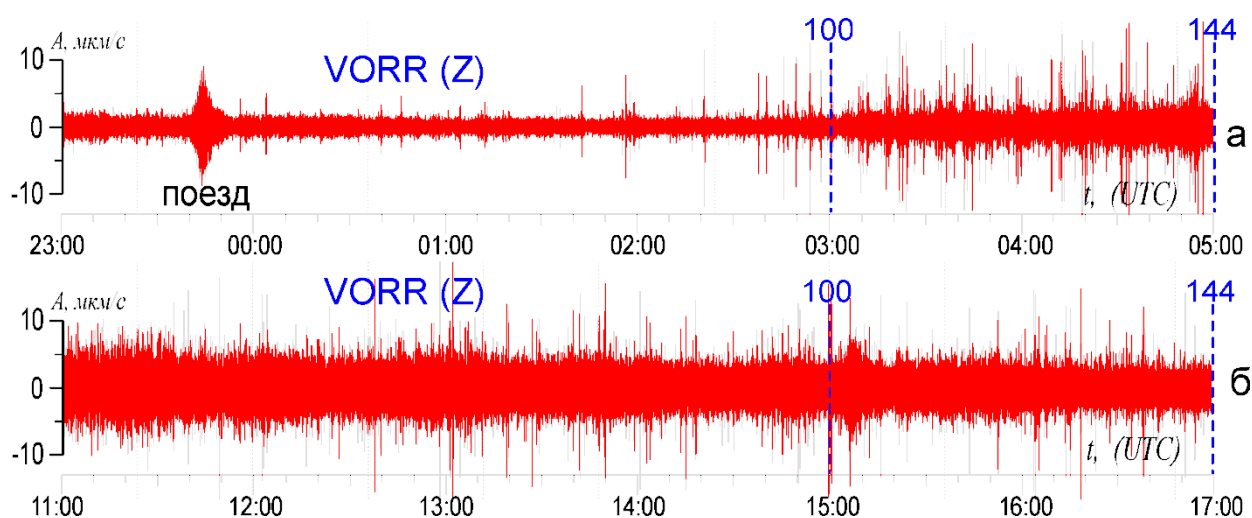


Рис. 10. Шести часовые интервалы записей вертикальных составляющих сейсмической станции «Воронеж» ночь-утро (а) и день-вечер (б), которые включают изменения сейсмического поля

На рис. 11 представлены Амплитудные спектры рассмотренных выше «Оценок» для двух вариантов длин интервалов в ночное и дневное время. На рис. 11а амплитудные спектры сгруппированы по отдельным интервалам, приведенным на рис. 10, а на рис. 11б «Оценки» разных интервалов записей сравниваются между собой.

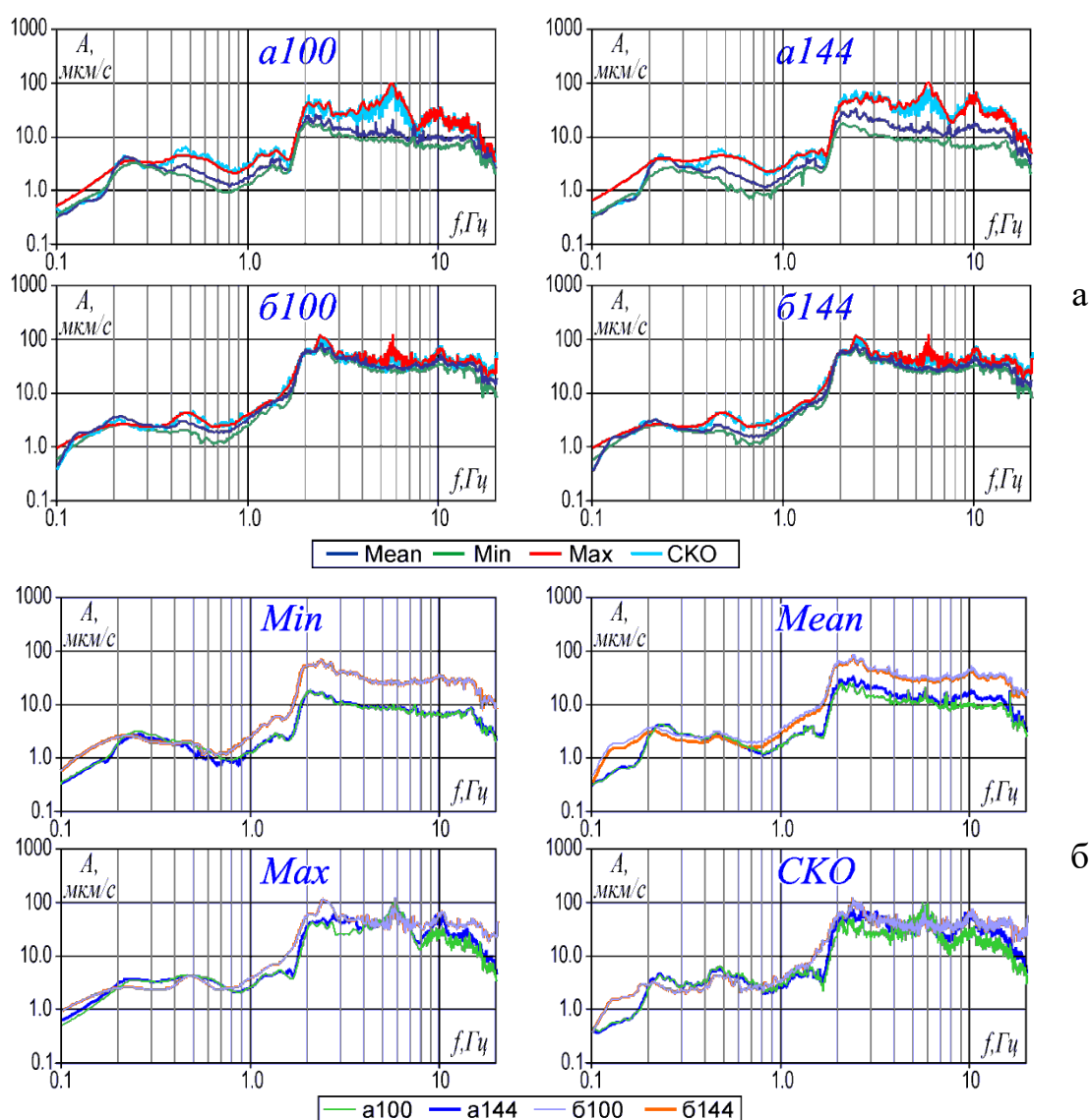


Рис. 11. Амплитудные спектры статистических оценок, сгруппированные по интервалам (а) и по типу оценки (б) для интервалов реальной записи приведенных на рис. 9

Как видно из рис. 11а для каждого интервала реальной записи (рис. 10) оценки располагаются в одинаковой последовательности. Снизу амплитудный спектр минимальных значений, в середине средних и сверху максимальный и среднеквадратический. Причем максимальный и среднеквадратический имеют близкие амплитуды, т.е. имеют несущественные различия, поэтому можно ограничиться максимальным амплитудным спектром, который легче считается и имеет более сглаженную форму. Для амплитудно-частотной характеристики стационарной и нестационарной составляющих сейсмического поля в пункте наблюдения на выбранном интервале времени можно использовать как сами скорректированные максимальные, минимальные и средние амплитудные спектры, так и их соотношения.

Для получения характеристики нестационарных составляющих сравним оценки, полученные на разных интервалах. Как видно из рис. 11б минимальные оценки сгруппировались по «времени суток», т.е. минимальный амплитудный спектр для короткого и полного интервала практически не отличаются, а между дневной и ночной оценкой MIN различия существенны. Это связано с присутствием на записях днем техногенной нагрузки, а поэтому их разница определяет её уровень в пункте наблюдения. Коэффициент вариации техногенной нагрузки, который показывает степень техногенной загруженности территории, можно получить делением её уровня на значения фоновых амплитуд ночного времени. В сочетании с фоновой составляющей создают начальные условия, которые являются «нормальными» для длительно проживающего на этой территории населения.

Если рассматривать «оценки» MAX и MIN, по их разнице можно получить характеристику максимального воздействия («амплитуду») помех на выбранном интервале. Сравнив её со значениями фоновых амплитуд можно получить коэффициент, характеризующий степень не стационарности сейсмического поля данной территории в данный временной отрезок.

Оценка MEAN на рис. 11 располагается между оценками MIN и MAX, причем её положений относительно этих границ не одинаково. Это связано с

особенностью «поведения» помехи на выбранном интервале, что может быть дополнительной характеристикой «не стабильности» её поведения. Для этого рассмотрим отношение «мощности» MEAN к «амплитуде» помех. Получаемая величина ограничена диапазоном от 0 до 1, где приближение к «0» показывает не стабильное (одиночное или разно амплитудное) поведение помехи на интервале, а при стремлении к «1» характеризует помеху как регулярные всплески, практически равных амплитуд. Описанные выше параметры, характеризующие составляющие сейсмического поля, рассчитанные по «Оценкам» интервала записи приведены в таблице.

Таблица

**Варианты параметров стационарной и не стационарной составляющих
сейсмического поля и их расчет с использованием оценок для
выбранного интервала записи**

№	Имя	Описание	Формула	Примечание
1	2	3	4	5
1	Параметры стационарной и нестационарной составляющих на анализируемом интервале сейсмической записи и в рабочей полосе частот			
1.1	U_f	Уровень фоновой (природной) составляющей в пункте наблюдения ночью	MIN(night)	Для ночного интервала
1.2	U_d	Уровень постоянной составляющей в пункте наблюдения днем	MIN(day)	Для дневного интервала
1.3	U_{tn}	Уровень техногенной нагрузки в пункте наблюдения за текущие сутки	$U_d - U_f$	В течении одних суток
1.4	V_{tn}	Коэффициент вариаций техногенной нагрузки за текущие сутки	$(U_d - U_f) / U_f$	В течении одних суток
1.5	U_p	Уровень помех различного генезиса на выбранном интервале реальной записи	MAX – MIN	На выбранном интервале
1.6	V_p	Коэффициент не стационарности интервала записи	$(MAX - MIN) / MIN$	На выбранном интервале
1.7	Q_p	Коэффициент стабильности амплитуд на интервале записи	$\frac{(MEAN - MIN)}{(MAX - MIN)}$	Значение: [0,1]
2	Характеристики нестационарной составляющей отдельного фрагмента на анализируемом интервале сейсмической записи в рабочей полосе частот			
2.1	U_{Fnp}	Уровень помех различного генезиса на текущем фрагменте реальной записи	FRAGn – MIN	Для n-ого фрагмента на выбранном интервале
2.2	V_{Fnp}	Коэффициент не стационарности фрагмента записи	$(FRAGn - MIN) / MIN$	
2.3	Q_{Fnp}	Коэффициент стабильности амплитуд на фрагменте записи	$\frac{(FRAGn - MIN)}{(MAX - MIN)}$	

В пункте 2 таблицы используется оценка FRAGj (вместо MEAN) для получения аналогичных параметров, которые можно использовать для характеристики отдельных источников помех действующих в пределах интервала. Это позволяет оценивать распределение воздействия помех по временной шкале, что в случае оценки динамики изменения сейсмического поля является более пригодной, т.к. для получения «Оценок» минимальная длительность интервала составляет 3 часа, что позволяет в сутки получить всего 6 значений, которых достаточно для изучения влияния только техногенной нагрузки.

При необходимости оценить уровень сейсмического фона в населенном пункте относительно «мирового» уровня можно использовать нижнюю границу NLNM сейсмического шума модели Петерсона [17], которая получена по записям мировой сейсмологической сети и отражает минимальный уровень сейсмического фона на Земле. На рис. 12 приведены модели нижней и верхней границы Петерсона с амплитудными спектрами дневных и ночных фоновых колебаний на сейсмостанциях ВКМ, приведенные (преобразованные) к размерности модели $\{(m^2/c^4)/Gu\}$ спектра мощности ускорения относительно уровня $1 m/c^2$.

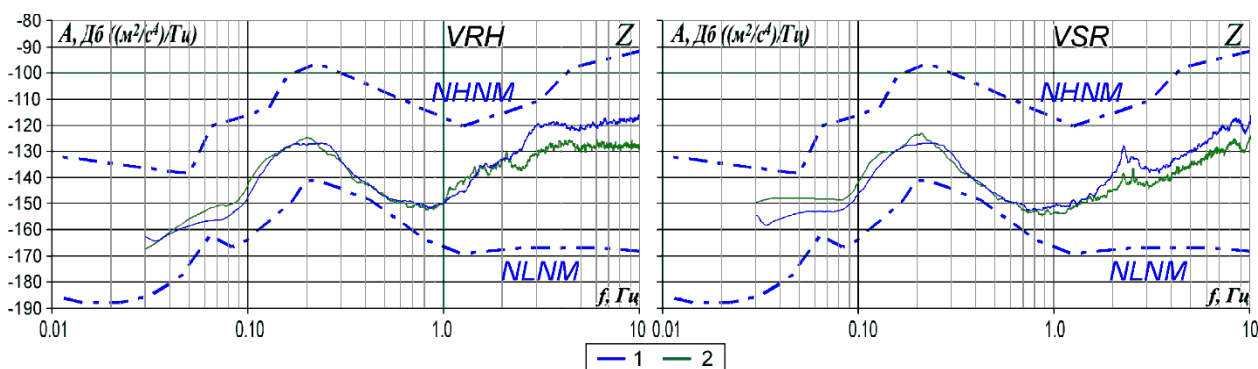


Рис. 12. Сравнение осредненных амплитудных спектров свободных от помех 5-ти минутных фрагментов в дневное (1) и ночное (2) время на станциях региональной сети «Новохоперск» (VRH) и «Сторожевое» (VSR) с моделями границ сейсмического шума Петерсона NLNM и NHNM

Как видно из рис. 12 в размерности модели сейсмического шума Петерсона фоновые колебания на обеих сейсмостанциях опускается ниже минус 150 Дб. Поэтому использование сейсмического поля для решения экологических задач возможно только когда собственный шум сейсмометрического канала используемого оборудования во всей рабочей полосе частот канала был ниже минус 155 Дб в размерности модели Петерсона, а лучше ниже его границы NLNM в рабочей полосе частот. В случае использовании границ Петерсона, в качестве «нулевого» уровня, нужно не забыть преобразовать их к размерности используемого амплитудного спектра.

Таким образом, с использованием моделирования сейсмического фона Гауссовым белым шумом разработана группа надежных статистических оценок его осредненного амплитудного спектра и алгоритм их расчета. На основе расхождений оценок, возникающих в случае исследования реальных записей, содержащие нестационарные составляющие любого генезиса, разработан набор числовых параметров, характеризующие как «нормальную» составляющую сейсмического поля населенного пункта, так и «аномальную». Это позволит в дальнейшем полноценно использовать сейсмическое поле, по аналогии с другими геофизическими полями, а при его совместном применении с другими экологическими методами создает предпосылку разработки критериев оценки по степени комфортности жизнедеятельности населения на исследуемой территории.

ВЫВОДЫ

Описанное выше исследование по изучению свойств фонового сейсмического поля на территории Воронежского кристаллического массива подтвердило его существование, определило его важное свойство и позволило разработать методику и алгоритм решения трудной задачи оценки его осредненного амплитудного спектра на заданном интервале записи сейсмического шума, включающего также «помехи» различной амплитуды и

генезиса. Основное свойство фонового сейсмического поля является то, что в пункте наблюдения (на записи) оно создает сейсмический процесс, являющийся Гауссовым белым шумом, у которого форма трехкомпонентного амплитудного спектра содержит полезную геолого-геофизическую информацию в пункте наблюдения.

Проведенное моделирование записи Гауссова белого шума, который выступал в роли «чистого» (без помех) сейсмического фона, позволило получить несколько вариантов «Оценок» его осредненного амплитудного спектра. Как оказалось статистические характеристики (min, max, ср.кв.откл (СКО)) отдельных спектральных амплитуд гармоник, можно считать случайной величиной, значения которой выбираются из спектров фрагментов получаемых с заданным шагом из исходного интервала записи, имеют близкие коэффициенты пропорциональности среднему значению (mean) для разных гармоник. То есть полученные зависимости статистических характеристик от частоты, которые были названы минимальным, максимальным, средним и среднеквадратическим амплитудными спектрами являются вариантами оценки осредненного амплитудного спектра интервала записи ГБШ с точностью до постоянного масштабного коэффициента, значение которого зависит от числа используемых для расчета фрагментов.

Получена эмпирическая зависимость значений коэффициентов от числа фрагментов и проведена оценка среднеквадратического отклонения и доверительного интервала по всему диапазону частот (по всем гармоникам). Оптимальное число фрагментов для расчета оценок составляет от 70 до 100, при этом коэффициент вариации составляет 10%, а величина доверительного интервала с уровнем доверия 0.999 в 20 раз меньше его среднеквадратического значения. Относительная стабильность масштабных коэффициентов позволило скорректировать (коэффициентом соответствующим числу фрагментов) амплитудные спектры статистических характеристик и получить оценки осредненного амплитудного спектра ГБШ (MEAN): MIN, MAX и СКО, а также без коррекции сглаженный амплитудный спектр любого из фрагментов FRAGj.

Приведенная схема алгоритма расчета и примеры его применения для реальных записей, содержащих «помехи» различного генезиса показали, что составляющие помех практически отсутствуют в оценке MIN, которая в случае ночного интервала времени максимально приближена к осредненному амплитудному спектру сейсмического фона в пункте наблюдения, являющейся носителем важной геолого-геофизической информации. В случае присутствия на записях техногенной нагрузки или сейсмической бури эта оценка (MIN) является характеристикой стационарной составляющей интервала записи.

Аддитивное свойство амплитудного спектра позволяет использовать простую разность между «Оценками», чтобы получить частотную характеристику нестационарной составляющей интервала записи, информация о которой содержится в других оценках (MAX, MEAN, СКО и FRAGj). Используя комбинации «Оценок» предложены варианты числовых параметров, характеризующих стационарную и не стационарную составляющие сейсмического поля в пункте наблюдения, которые с точки зрения экологического применения можно назвать «нормальными» и «аномальными» составляющими сейсмического поля, что позволит в дальнейшем полноценно использовать сейсмическое поле, по аналогии с другими геофизическими полями. Это положит начало разработке критериев для оценки степени комфортности жизнедеятельности населения на исследуемой территории.

Однако не надо забывать, что в такой большой и перспективной «бочке мёда» есть маленькая, но очень дорогая «ложка дегтя», которая связана с необходимостью использования дорогого сейсмологического оборудования, которое может обеспечить регистрацию фоновых колебаний, а не своего собственного шума регистрирующего канала. Другим неприятным для экологического использования моментом является то, что использование оборудования российского производства сертифицированного как «Средство измерения» не подходит без дополнительного тестирования по объективным

причинам. Имеющееся тестовое (поверочное) оборудование для генерации колебаний (вибростенд) «физически» не способен выдать низкоамплитудные колебания скорости (20-100 нм/с) в рабочей полосе частот хотя бы до 20 Гц. А если даже вдруг он это сможет, то проблема будет в цене деления интерферометра, который используется для определения амплитуды реальных колебаний платформы. Она для лазера в видимом диапазоне равна половине длины волны, которая составляет от 300 до 800 нм. То есть амплитуда смещения для этих скоростей в высокочастотной части будет меньше цены деления интерферометра. Можно сказать, что сертификация гарантирует только возможность «измерять слонов», но не гарантирует возможность не только измерить, но и даже «заметить мышек». На самом деле качественное российское оборудование для сейсмологического мониторинга существует, но их производитель из-за «нецелесообразности» сертификацию изделий не проводит, т.к. результат сейсмологического мониторинга (координаты и глубина очага, время в очаге, а также магнитуда) не может иметь эталонов, по которым это оборудование можно было бы сертифицировать.

Подводя итог, можно констатировать, что для геофизических исследований использование результатов приведенных в работе территории не вызовет больших проблем, так как в своем большинстве используется прецизионное сейсмологическое оборудование, и необходимо лишь слегка поправить алгоритм обработки. В случае с экологическим применением впереди долгая и трудная дорога по внедрению описанной технологии. В свете развития нового подхода к повышению качества жизни населения, предотвращения крупномасштабных ЧС, заботой о его здоровье сегодня это является актуальной задачей, поставленной в рамках Национальных проектов.

Список литературы

1. Трофимов В.Т., Зилинг Д.Г. Экологическая геология. Учебник. - М.: ЗАО Теоинформмарк", 2002.-415 с.
2. Куриленко В. В., Хайкович И. М., Лебедев С. В. Геофизические поля в экологической геологии // Вестник СПбГУ, Сер. 7. -2016. - Вып. 1. – С. 15-28.

3. Сунгатуллин, Р.Х. Экологическая геология (краткий конспект лекций), Казань: К(П)ФУ, 2013. – 80 с.
4. Садовский М.А., Николаев А.В. Новые методы сейсмической разведки. Перспективы развития. // Вестник АН СССР. - 1982. - №1. - С. 57-64.
5. НТК АНЧАР [электронный ресурс], -<http://anchar.ru/tehnologiya-anchar.html> – сайт в интернете.
6. ЗАО "Градиент" [электронный ресурс], -<http://www.gradient-geo.com/method.htm> – сайт в интернете.
7. Пат. 2271554 Российская Федерация, МПК G01V 1/00. Способ разведки / Горбатиков А.В.; заявл. 25.03.2005; опубл. 10.03.2006. Бюл.№7. -9с.
8. Чеботарёва, И.Я. Структура и динамика геосреды в шумовых сейсмических полях, методы и экспериментальные результаты : дис. ... д.физ.-мат. наук: 25.00.10: защищена 29.09.2011 / Чеботарёва Ирина Яковлевна, М.: ИПНГ РАН, 2011. - 350 с.
9. Nakamura, Y. Quarterly Report of RTRI / Y. Nakamura; Railway Technical Research Institute (RTRI). – 1989. - Vol. 30. - No. 1.
10. Любушин, А.А. Анализ микросейсмического шума дал возможность оценить магнитуду, время и место сейсмической катастрофы в Японии 11 марта 2011 г. // Наука и технологические разработки, 2011.- No1.- С. 3-12.
11. Беклемишев, А.Б., Потапов О.А., Таратын Э.А., Буданов В.Г., Миколаевский Э.Ю., Дубянский В.И. Опыт прогноза локальных геодинамических рисков через инструментальные данные и анализ динамики микросейсмического вектора // Горный информационно-аналитический бюллетень. № 12/2007, Неделя горняка 2007
12. Беклемишев, А.Б. Научно-методические и экспериментальные основы технологии изучения пассивных сейсмических явлений : авт.реф. дис.,... докт.тех.наук: 25.00.16 / Всерос. науч.-исслед. ин-т геологич., геофиз. и геохим. систем Мин-ва природных ресурсов РФ и РАН. - Москва, 2006. – 40 с.

13. Сафронич И.Н., Надежка Л.И. Некоторые особенности микросейсмического процесса в пределах региональных структурно-тектонических элементов Воронежского кристаллического массива // Доклады РАН.-2008.-т.418.-№5.-С.689-692.

14. Надежка Л.И., Сафронич И.Н., Орлов Р.А., Ефременко М.А. Микросейсмические исследования на территории Воронежского кристаллического массива // Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы: Кн.2. Микросейсмичность под редакцией Н.В. Шаров, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукин.- Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. – С. 48-80.

15. Сафронич И. Н., Красилов С. А., Колесникова С. И., Савенков А.В. Особенности последней версии процессора обработки сигналов в программном комплексе WSG и возможности его использования в научно-исследовательской работе // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных.– Обнинск: ГС РАН, 2016.– С. 380-389.

16. Сафронич И.Н., Красилов С.А., Колесников И.М., Колесникова С.И., Анализ данных в частотной области с использованием процессора обработки сигналов программного комплекса WSG // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных.– Обнинск: ГС РАН, 2017.– С. 386-395.

17. Jon Peterson, Observation and Modeling of Seismic Background Noise. Open-File Report 93-322, Albuquerque, New Mexico, 1993 year, 42 pp.