

КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЖДУ ДЛИННОПЕРИОДНЫМИ И ВЫСОКОЧАСТОТНЫМИ СОСТАВЛЯЮЩИМИ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ФОНА

А.А. Спивак, В.А. Харламов

Приведены результаты оценок корреляционных соотношений для амплитудных вариаций микросейсмического фона в разных частотных диапазонах. Показано, что возмущения длиннопериодной составляющей микросейсмических колебаний (периоды 10–100 с) со значимой корреляцией вызывают амплитудные вариации микросейсмического фона на высоких частотах (5–20 Гц). При этом запаздывание реакции высокочастотных колебаний меньше для более интенсивных возмущений длиннопериодной составляющей и больше для высокочастотных составляющих, характеризующихся большей частотой. Полученные данные допустимо рассматривать также как свидетельство о направленности развития деформационного процесса в сложно построенной блочно-иерархической среде от большего масштаба к меньшему.

Введение

Изучение длиннопериодных составляющих микросейсмического фона представляет самостоятельный интерес как с точки зрения оценки энергетической насыщенности микроколебаний земной коры [Widmer-Schmidrig, 2003; Peterson, 1993], так и для установления резонансных свойств неоднородной по структуре геофизической среды [Спивак, Кишкина, 2004] и роли космических факторов¹ в формировании режимов деформирования вещества Земли [Хаин, Халилов, 2009]. Особо следует отметить важность разработки способов предсказания вероятных землетрясений на основе анализа низкочастотных сейсмических сигналов [Левин, Сасорова, 1999] и вариаций периодичностей сейсмических потоков как дискретной составляющей сверхдлиннопериодных возмущений [Соболев, 2003], а также описания внутриплитовых движений [Дьяконов и др., 1996].

Объективные сложности регистрации длиннопериодных колебаний (частоты ниже примерно 0,1 Гц), связанные с ограниченным динамическим диапазоном доступных средств сейсмической регистрации и их достаточно низкий по периодам порог,² приводят к необходимости построения новых подходов к определению характеристик длиннопериодных колебаний по параметрам высокочастотных (1–100 Гц) составляющих сейсмического фона³.

В связи с вышесказанным, исследование преобразования энергии длиннопериодных сейсмических процессов в энергию высокочастотных составляющих микросейсмических шумов можно рассматривать как весьма актуальное.

¹ Таких, например, как периодичности орбитального и осевого движений Земли, их вариации, собственные колебания планеты.

² Верхняя граница (по периодам регистрируемых событий) наиболее распространенных в сейсмологической практике сейсмоприемников STS-1 и STS-2 составляет соответственно 300 и 120 с.

³ Аппаратура и методы анализа высокочастотного сейсмического шума не вызывают особых затруднений.

Закономерности передачи энергии между составляющими микросейсмического фона в разных частотных интервалах могут рассматриваться одновременно и как источник информации о направленности деформационных процессов в земной коре блочно-иерархического строения. Действительно, деформационные процессы в земной коре осложнены наличием в ней иерархической блочной структуры. Можно предполагать, что сложно структурированная среда, состоящая из более или менее монолитных блоков, перемежающихся зонами повышенного деформирования породы (межблоковые промежутки) разного масштаба, предстает в виде набора определенных фильтров, которые определяют частотный состав местного микросейсмического шума.

Внешние воздействия различной интенсивности и частотного состава активизируют структурные блоки определенного размера [Родионов и др., 1986; Кочарян, Спивак, 2003] (ранг активизируемых блоков соответствует пространственным и временным характеристикам воздействия). Особенности деформирования среды на последующих этапах определяются внутренней иерархической структурой этих блоков, а также структурой окружающей среды. При этом одним из важных вопросов является установление направленности развития инициированных деформационных процессов, а именно: деформация первоначально активизированной структуры вызывает консолидацию блоков на более низком иерархическом уровне (т.е. происходит консолидация активизированных блоков и блоков более низкого ранга), либо деформация передается на более высокий иерархический уровень, вызывая активный деформационный процесс внутри первоначально активизированного блока (составляющие его блоки меньшего размера «подстраиваются» под новое напряженно-деформированное состояние активизированного блока)? Иерархическая направленность деформационного процесса в процессе преобразования энергии одних иерархических уровней в другие определяет помимо прочего особенности преобразования, а также направленности перетоков энергии и структурной перестройки внутри среды.

Один из возможных путей решения этого вопроса также связан с исследованием связей между длиннопериодными возмущениями и высокочастотными составляющими микросейсмического фона [Кочарян, Кабыченко, 2003].

Одним из первых успешных исследований в этом направлении является работа [Рыкунов и др., 1982]. В этой работе на основе анализа микросейсмического шума были получены первые корреляционные соотношения между интенсивностью шторовых микросейсм в диапазоне периодов 4–9 с и огибающей узкополосной составляющей высокочастотного сейсмического шума на сейсмической станции «Обнинск» (обрабатывались огибающие на частоте 27 Гц). В качестве основного результата в работе [Рыкунов и др., 1982] получена значимая корреляция между интенсивностью микросейсмической бури и уровнем высокочастотного сейсмического шума на выбранной частоте. При этом отмечено некоторое запаздывание по времени между возрастанием уровня микросейсм и уровнем высокочастотных сейсмических шумов.

В настоящей работе исследовались корреляционные соотношения между амплитудными вариациями микросейсмического фона в разных частотных диапазонах: 0,01–0,1 Гц и 1–20 Гц (последний разбивался на поддиапазоны шириной 2–4 Гц).

Объекты и метод исследований

Для анализа привлекались результаты сейсмической регистрации, выполненной в период с 2006 по 2009 гг. в разных регионах России. Привлекались данные

сейсмической станции МНУ (геофизическая обсерватория «Михнево» ИДГ РАН) [Спивак и др., 2005], а также результаты сейсмической регистрации, выполненной в период с 04 по 23 августа 2009 г. в пос. Аршан (Тункинская система рифтовых впадин юго-западного участка Байкальской рифтовой зоны [Иванченко и др., 2009]).

Выполнялось сравнение амплитудных вариаций составляющих сейсмического фона в частотных диапазонах 0,01–0,1 Гц; 0,1–1 Гц; 1–2 Гц; 2–4 Гц; 4–6 Гц; 6–8 Гц; 8–10 Гц и 10–20 Гц. Вычисление огибающих фоновых амплитуд и их сравнительный анализ в указанных частотных диапазонах производился с помощью программных средств MatLab. Оценка уровня колебаний в разных частотных диапазонах производилась по результатам расчета среднеквадратичных значений амплитуды по пяти- и двадцатиминутным интервалам. С целью характеристики корреляционных соотношений вычислялись коэффициенты ранговой корреляции Спирмена [Сидоренко, 2001].

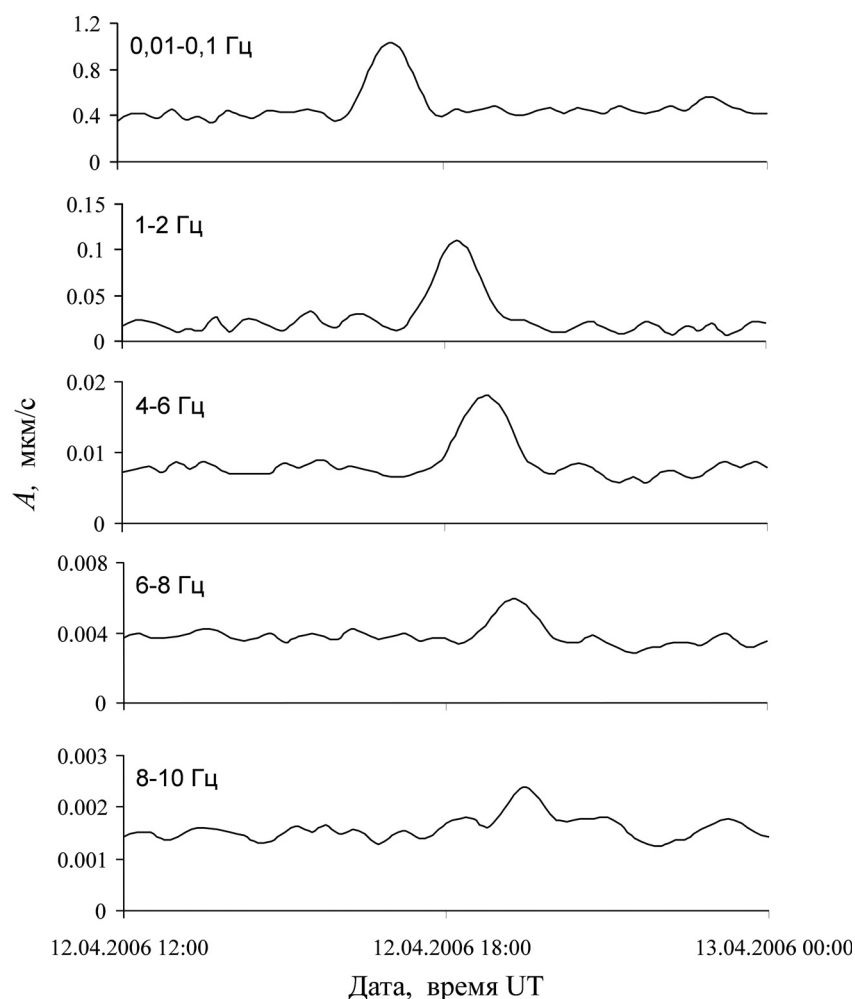


Рис. 1. Пример амплитудных вариаций микросейсмического фона (сейсмическая станция МНУ) в разных частотных диапазонах (приведены в поле рисунка); результат усреднения в скользящем окне шириной 15 мин.

С учетом результатов работы [Рыкунов и др., 1982] производился сопоставительный анализ вариаций низкочастотной составляющей и следующих за ними наиболее близких по времени вариаций высокочастотных колебаний (рис. 1). Как это видно из рис. 1, после увеличения интенсивности микросейсмического фона в частотном диапазоне 0,01–1 Гц с некоторой задержкой (примерно 2–3 часа) наблюдаются амплитудные вариации фона на частотах 1–10 Гц.

Объектами исследований являлись амплитудные вариации микросейсмического фона, несинхронные в длиннопериодной и высокочастотной частях спектра¹. Здесь следует отметить, что наряду с указанными в сейсмических записях присутствуют также вариации сейсмического фона, проявляющиеся одновременно во всей полосе рабочих частот, а также вариации длиннопериодной составляющей, которые не сопровождаются возмущением высокочастотных составляющих фона (в качестве примера можно привести возмущения сейсмического фона в частотном диапазоне 0,01–0,1 Гц вследствие циклонической активности [Адушкин и др., 2008; Локтев, Спивак, 2007]). Не обсуждая природу и конкретные механизмы возникновения несинхронных вариаций фоновых микроколебаний², отметим, что указанные колебания исключались из рассмотрения. Анализировались непродолжительные по времени (длительностью 0,5–5 ч) длиннопериодные возмущения³, сопровождающиеся вариациями высокочастотных составляющих сейсмического шума. Признаками того, что амплитудные вариации шума на высоких частотах являются следствием длиннопериодного возмущения, служили следующие: 1) – возмущения фона на высоких частотах следует практически сразу за длиннопериодными, 2) – сходство огибающих длиннопериодных и короткопериодных вариаций фона, 3) – достаточно высокая корреляция между указанными огибающими при определенных временах сдвига.

Связь сейсмического шума с длиннопериодными возмущениями

Хорошо известно, что возмущение среды приводит к возрастанию амплитуды сейсмического фона. В качестве примера на рис. 2 приведены данные, полученные Н. Ekstrom [www.ldeo.columbia.edu/~ekstrom/Research/Noise/] при анализе глобального сейсмического фона (привлекаются данные с 200 сейсмических станций, расположенных в разных районах мира). Отчетливо видно, что крупные землетрясения вне зависимости от положения очага вызывают глобальное увеличение амплитуды микросейсмического фона. Это означает, что даже слабые возмущения в виде сейсмических волн от удаленных землетрясений вызывают в среде процессы, результатом которых являются ее достаточно продолжительные колебания (как это видно из рис. 2 длительность возмущения сейсмического шума может достигать нескольких часов). При этом более длительные возмущения отмечаются для более высокочастотных составляющих фоновых колебаний.

¹ Отметим, что помимо отклика резонансных структур земной коры на внешние возмущения несинхронность колебаний в разных частях спектра может быть связана также с дисперсионными особенностями сигналов [Shapiro, Campillo, 2004].

² Наряду с классическими микросейсмами в сейсмическом фоне присутствуют длиннопериодные вариации импульсной формы с неустановленным в настоящее время источником [Кабыченко, Павлов, 2006].

³ Для настоящих исследований пригодны сигналы как естественного, так и техногенного происхождения.

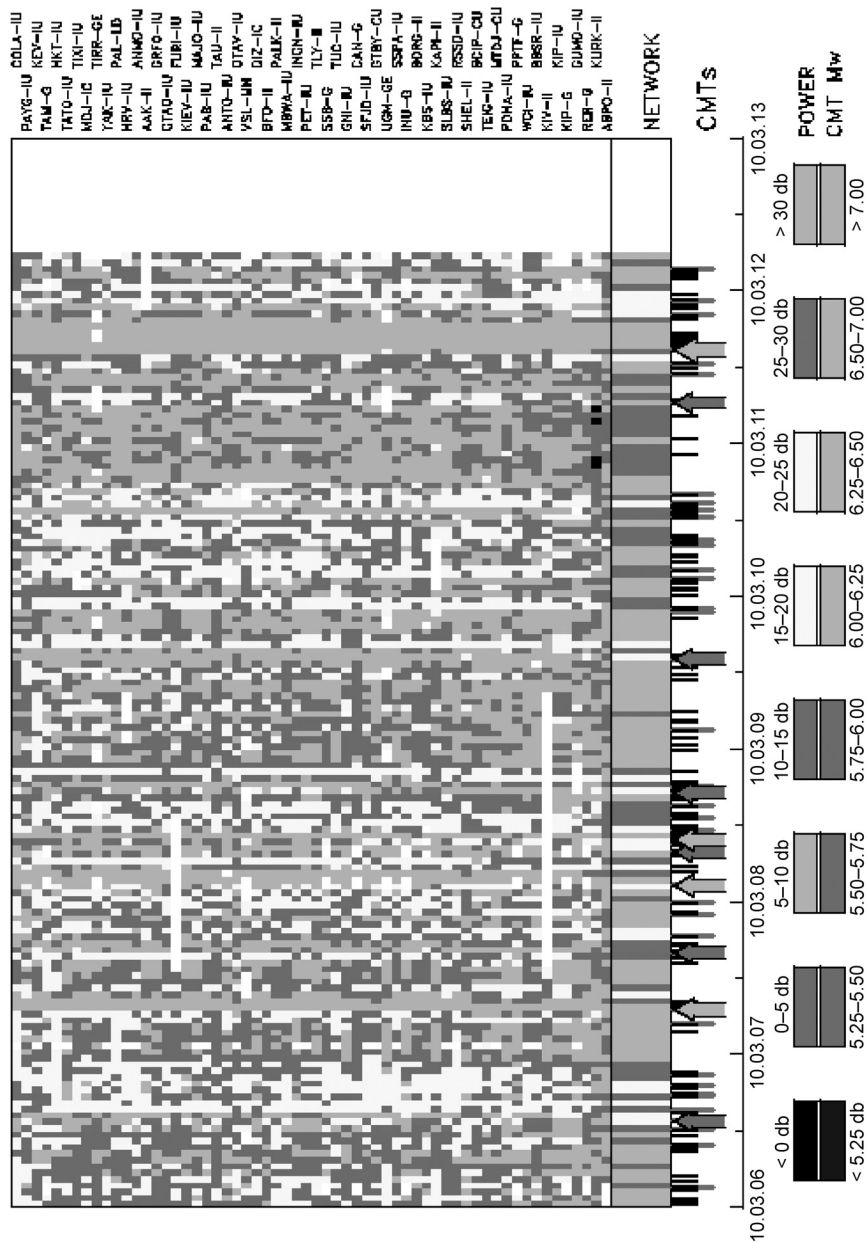


Рис. 2. Интенсивность микросейсмических колебаний с периодом 23 с на сейсмических станциях IRIS GSN и других станциях мировой сейсмической сети (интенсивность вертикальной компоненты приведена в виде отклонения от зависимости Петерсона [Peterson, 1993; Окада, 2003] в Дб).
Стрелками обозначены времена зарегистрированных землетрясений с магнитудой $> 4,0$.

Другой пример связан с увеличением среднеквадратичной амплитуды микросейсмического фона при барических вариациях в атмосфере [Адушкин и др., 2008], когда деформирование приповерхностных участков земной коры вызывает отклик в виде амплитудных вариаций микросейсмического шума в разных частотных диапазонах в зависимости от источника и характера барических вариаций. В отличие от первого примера, здесь следует отметить, что вызванные длиннопериодным воздействием, например, антициклоном, амплитудные вариации сейсмического фона в диапазоне частот 0,1–1 Гц не приводят к коррелированным с ними вариациям фона в более высокочастотной области, что наблюдается в случае вариаций интенсивности микросейсм [Рыкунов и др., 1982]. По всей видимости, это может быть связано с механизмом воздействия: деформирование среды с малыми скоростями деформирования в отсутствие знакопеременных движений вызывает активизацию блоковых структур только определенного размера (эффект резонансного отклика), причем активизированные блоки деформируются консолидированно¹ (преобразование энергии длиннопериодных движений в высокочастотные колебания отсутствует). В том случае, когда внешнее воздействие представляет собой цуг знакопеременных колебаний с достаточно высокой скоростью деформирования среды, сначала, что естественно, активизируются блоки с размерами, соответствующими частоте возмущения, а затем происходит перестройка их внутренней структуры в виде активизации движений блоков более высокого ранга (внутренняя структура «подстраивается» под изменения формы составного блока).

В этом смысле с решением вопроса о направленности «перекачки» энергии (от длиннопериодных колебаний в высокочастотные или наоборот) непосредственно связано понимание того, каким именно образом происходит в среде структурная перестройка, а именно: направленность преобразования структуры происходит от блоков большего размера к блокам меньшего, или наоборот – деформация большого структурного блока является результатом квазинезависимого деформирования составляющих его блоков меньшего размера?²

Здесь следует отметить, что, по всей вероятности, существует предельный размер максимальной структуры, на которую может влиять определенный класс воздействий (размер активизируемого блока должен соответствовать частоте и энергетике внешнего воздействия).

Результаты

С целью установления количественной связи между возмущениями сейсмического фона в разных частотных диапазонах анализировались корреляционные соотношения между их амплитудными вариациями. Коэффициент корреляции между уровнями сейсмического шума в разных частотных диапазонах вычислялся в зависимости от величины временного сдвига T . В качестве примера на рис. 3 приведены значения коэффициента корреляции K между огибающими амплитудных вариаций микросейсмического шума для двух случаев: для частотных диапазонов

¹ В соответствии с концепцией блочно-иерархического строения земной коры по М.А. Садовскому многограновая структура геофизической среды может быть представлена в виде набора консолидированных и деконсолидированных блоков в зависимости от условий деформирования.

² В отличие от настоящей работы в работе [Рыкунов и др., 1982] в качестве механизма преобразования энергии длиннопериодных сейсмических колебаний в энергию высокочастотного сейсмического шума рассматривается переизлучение энергии при локальном трещинообразовании.

0,01–0,1 Гц и 1–10 Гц и 2–4 и 8–10 Гц (положительное смещение вдоль временной оси соответствует запаздыванию отклика колебаний с большей частотой). Из рис. 3 можно сделать предварительные выводы о том, что, во-первых, действительно наблюдается запаздывание вариаций более высокочастотных колебаний относительно колебаний с меньшей частотой (максимальная корреляция между коле-

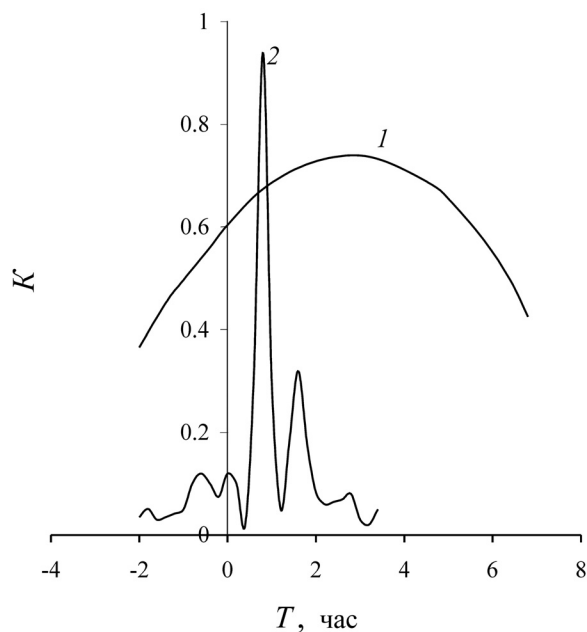


Рис. 3. Значения коэффициента корреляции K между огибающими длиннопериодной (период от 10 до 100 с) и высокочастотной (1–10 Гц) составляющими микросейсмического фона (1) и между среднеквадратичными вариациями амплитуды фона в частотных диапазонах 2–4 Гц и 8–10 Гц (2) в зависимости от времени сдвига для сейсмической станции МНВ (12.04.2006 г.).

Превышение длиннопериодной составляющей над фоновыми значениями составляет 1,8, длительность длиннопериодного возмущения около 5 час.

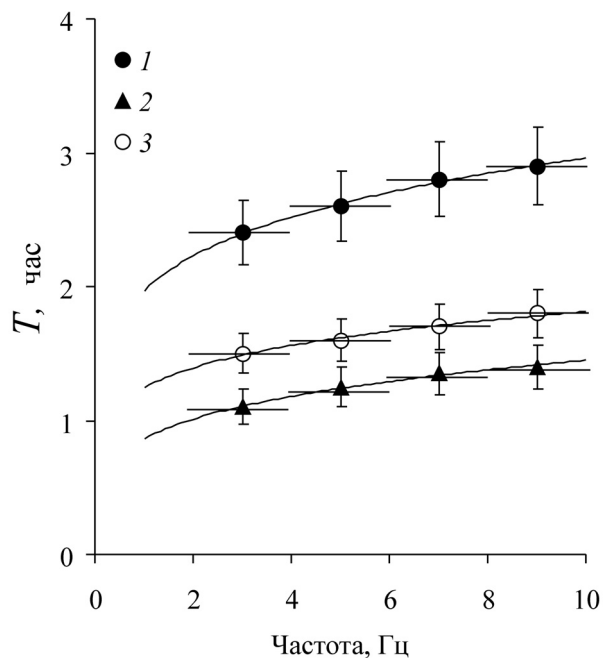


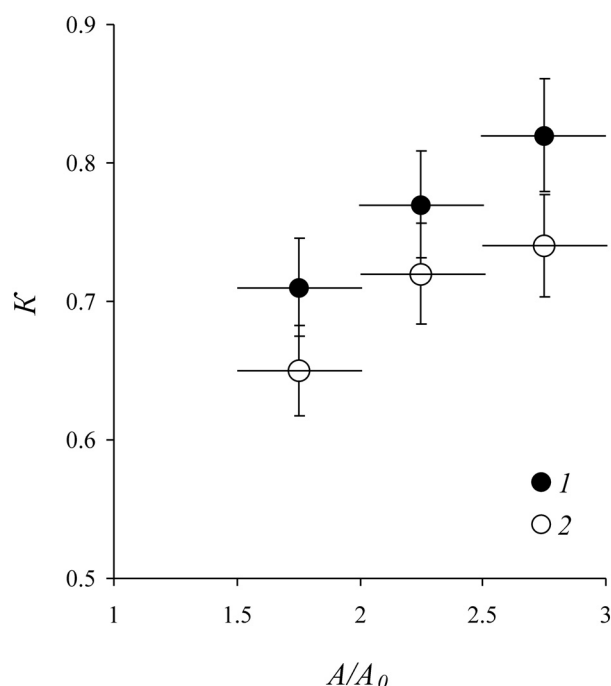
Рис. 4. Среднее значение времени сдвига по всем амплитудам длиннопериодного возмущения, при котором достигается максимальная корреляция между длиннопериодными возмущениями микросейсмического фона и его высокочастотными составляющими; сейсмические станции: 1 – МНВ, 2 – Воркута, 3 – Аршан. Горизонтальные линии – диапазон частот, вертикальные – погрешность определения величины.

баниями с большей частотой и меньшей частотой наблюдается с запаздыванием), а, во-вторых, отмечается явное уменьшение величины относительного запаздывания с ростом частоты. Это хорошо демонстрирует рис. 4, на котором приведены времена сдвига отклика в зависимости от частотного диапазона. Видно, что с увеличением частоты запаздывание отклика относительно предыдущего частотного диапазона монотонно уменьшается¹. Характерно также, что зависимость времени запаздывания от частоты существенно отличается для разных районов.

Более детальный анализ показывает, что значение коэффициента корреляции зависит от амплитуды длиннопериодного возмущения, а именно: чем больше превышение среднеквадратичной амплитуды длиннопериодного возмущения над фоновыми значениями, тем выше значения K (рис. 5).

Рис. 5. Коэффициент корреляции между огибающими длиннопериодного возмущения и высокочастотными составляющими микросейсмического фона для разных относительных превышений амплитуды длиннопериодного возмущения над фоновыми значениями; сейсмические станции: 1 – МНВ; 2 – Воркута; 3 – Аршан.

Горизонтальные отрезки – рассматриваемый диапазон превышений A/A_0 , вертикальные – среднеквадратичное отклонение.



Связь между длиннопериодными и высокочастотными составляющими при возмущении фона землетрясениями. Особый интерес представляет рассмотрение корреляционных соотношений между амплитудными вариациями фона в разных частотных диапазонах в период значительных по амплитуде и продолжительных возмущений – распространения сейсмических волн от удаленных землетрясений. Визуальный анализ сейсмических записей свидетельствует о том, что возмущения, вызванные землетрясениями, проявляются одновременно во всех частотных диапазонах. Тем не менее, более детальный анализ корреляционных соотношений показывает, что все значительно сложнее. Действительно, максимальная корреляция между длиннопериодной и высокочастотными составляющими сейсмических колебаний, вызванных землетрясением, наблюдается при нулевом сдвиге по време-

¹ При этом наблюдается монотонное увеличение запаздывания относительно диапазона с минимальной частотой.

ни, что хорошо демонстрирует пример, приведенный на рис. 6. Однако, как это хорошо видно из рис. 6, при некотором сдвиге по времени между длиннопериодными и высокочастотными составляющими наблюдается второй, также значительный по амплитуде максимум. Следует отметить, что такой же второй максимум на зависимости $K(T)$ отмечается и при вычислении коэффициента корреляции между составляющими колебаний в соседних частотных интервалах (рис. 6).

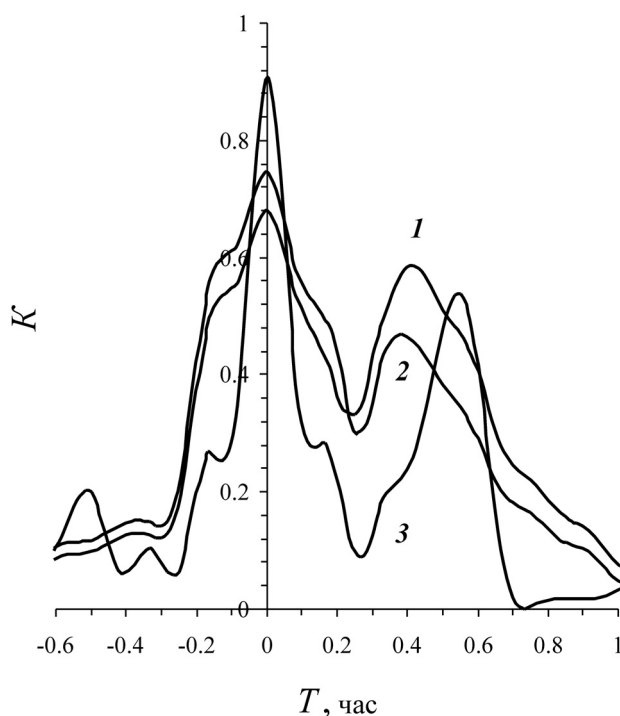


Рис. 6. Коэффициент корреляции между составляющими сейсмического фона в разных частотных диапазонах при регистрации землетрясения (Курилы, 13-01.2007 г. $M = 8,4$) сейсмической станцией MNV:

1 – между длиннопериодной составляющей (0,01–0,1 Гц) и колебаниями в частотном диапазоне 1–2 Гц;

2 – между колебаниями в частотных диапазонах 1–2 Гц и 4–6 Гц;

3 – между колебаниями в частотных диапазонах 2–4 Гц и 8–10 Гц.

Обнаруженную немонотонность изменения коэффициента корреляции в зависимости от величины сдвига нельзя объяснить только сложной волновой структурой сейсмического сигнала от землетрясения. Можно предполагать, что рост корреляции с увеличением временного сдвига связан с задержкой отклика более высокочастотных составляющих колебаний на вариации длиннопериодной составляющей. Действительно, если придерживаться высказанного выше предположения о том, что возмущение передается эстафетно от резонансных структур более низкого рангового уровня к более высоким, то наряду с процессом одновременного «возбуждения» всех иерархических структур среды в результате прихода широкополосного сейсмического сигнала, одновременно происходит перераспределение энергии колебаний между длиннопериодными и высокочастотными составляющими колебаний. Причем, это перераспределение происходит (что естественно) с задержкой.

Выводы

Первые результаты рассмотрения корреляционных соотношений, приведенные в настоящей работе, свидетельствуют о сложной связи между амплитудными ва-

риациями сейсмического фона в разных частотных диапазонах, и, как следствие, – сложном режиме процессов, протекающих в блочно-иерархической системе земной коры. Не претендуя на обобщение, следует отметить, что установленный факт запаздывания отклика более высокочастотных составляющих колебаний на длиннопериодные возмущения имеет не только самостоятельное значение, но одновременно с этим ставит задачу о рассмотрении соотношения между амплитудными вариациями (периодичностями и циклическостями) фоновых колебаний в разных частотных диапазонах и в периоды отсутствия значимых возмущений длиннопериодной составляющей, а также при возмущениях квазимонохроматического характера.

Авторы не претендуют на широту и глубину анализа поднятой проблемы. Вместе с тем полученные данные обнадеживают и могут служить основанием и отправной точкой для выполнения более детальных исследований.

Исследования выполнены по Программе 7 Отделения наук о Земле РАН «Внутреннее строение и физические поля Земли. Динамика взаимодействующих геосфер» и при финансовой поддержке РФФИ (грант 11-05-00096-а).

Литература

Адушкин В.В., Локтев Д.Н., Спивак А.А. Влияние барических возмущений атмосферы на микросейсмические процессы в земной коре // Физика Земли. 2008. № 6. С. 77–85.

Дьяконов Б.П., Кусонский О.А., Троянов А.К. Сверхдлиннопериодные сейсмические колебания и внутриплитовые движения // Доклады академии наук. 1996. Т. 346. № 1. С. 112–115.

Иванченко Г.Н., Локтев Д.Н., Соловьев С.П. Комплексные исследования активности тектонических нарушений в зоне Тункинской рифтовой впадины // Проблемы межгеосферных взаимодействий: сб. научных трудов ИГ РАН. М.: ГЕОС, 2009. С. 34–42.

Кабыченко Н.В., Павлов Д.В. Анализ структуры длиннопериодного сейсмического фона // Динамические процессы во взаимодействующих геосферах: сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2006. С. 324–333.

Кочарян Г.Г., Кабыченко Н.В. Проявление блоковых движений в длиннопериодном сейсмическом фоне // Геофизические процессы в нижних и верхних оболочках Земли: сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ИДГ РАН, 2003. С. 98–107.

Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. М.: Академкнига, 2003. 423 с.

Левин Б.В., Сасорова Е.В. Низкочастотные сейсмические сигналы как региональные признаки землетрясения // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4-5. С. 108–115.

Локтев Д.Н., Спивак А.А. Особенности микросейсмических процессов при барических возмущениях атмосферы // Физические поля и динамика взаимодействующих геосфер: сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2007. С. 30–40.

Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Основы геомеханики. М.: Недра, 1986. 301 с.

Рыкунов Л.Н., Старовойт Ю.О., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Связь штормовых микросейсм с высокочастотными сейсмическими шумами // Физика Земли. 1982. № 2. С. 88–91.

Сидоренко Е.В. Методы математической обработки в психологии. С.-П.: РЕЧЬ, 2001. 350 с.

Соболев Г.А. Эволюция периодических колебаний сейсмической интенсивности перед сильными землетрясениями // Физика Земли. 2003. № 11. С. 3–15.

Спивак А.А., Кишкина С.Б. Исследование микросейсмического фона с целью определения активных тектонических структур и геодинамических характеристик среды // Физика Земли. 2004. № 7. С. 35–49.

Спивак А.А., Овчинников В.М., Каракчеев В.Д. Сейсмостанция обсерватории «Михнево» // Динамические процессы в системе внутренних и внешних взаимодействующих геосфер: сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2005. С. 19–21.

Хаин В.Е., Халилов Э.Н. Цикличность геодинамических процессов: ее возможная природа. М.: Научный мир, 2009. 520 с.

Okada H. The microtremor survey method. Soc. Explor. geophys. Tulsa, U.S., 2003. 135 p.

Peterson J. Observation and modeling of background seismic noise. U.S. Geol. Surv. Open-File rept., Albuquerque. 1993. 93–322.

Shapiro N.M., Campillo M. Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise // Geophys. Res. Letters. 2004. V. 31, L07614, doi:10.1029.

Widmer-Schmid R. What can superconducting gravimeters contribute to normal-mode seismology? // Bull. Seismolog. Soc. Am. 2003. V. 93. No. 3. P. 1370–1380.