

УДК 551.596

*А.В. СОЛОВЬЕВ, Д.С. ПРОВОТОРОВ, А.А. БОЧАРОВ, К.В. ВОЗНЕСЕНСКАЯ***СЕЗОННО-СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ФОНОВЫХ ИНФРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДАВЛЕНИЯ В ЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ 0,01–32 Гц В ГОРОДЕ ТОМСКЕ<sup>1</sup>**

Описаны результаты исследований инфразвуковых колебаний давления в диапазоне частот от 0,01 до 32 Гц. Приведена морфология инфразвукового фона в диапазоне частот от 0,01 до 32 Гц. Показано, что суточные и сезонные изменения уровня фоновых инфразвуковых колебаний присутствуют во всей области частот от 0,01 до 32 Гц.

*Ключевые слова:* инфразвук, инфразвуковой фон, сезонно-суточные вариации, спектр флуктуаций.

Инфразвуковой фон весьма разнообразен, в различных регионах земного шара имеет свои отличия. Однако имеются и общие тенденции изменения, такие, как сезонные и суточные флуктуации уровня инфразвуковых шумов. Инфразвуковые колебания в атмосфере Земли являются результатом действия многочисленных источников: землетрясения, цунами, извержения вулканов, водопады, грозы, колебания поверхности моря, лесные пожары, сильный ветер, турбулентность атмосферы и т.п. [1]. Частотные составляющие сигналов от этих источников находятся в различных областях спектров от долей до десятков герц. Инфразвуковые колебания давления с амплитудой, значительно превышающей уровень естественного фона, вызывают ярко выраженные изменения функционального состояния организма человека [2].

До настоящего времени опубликовано множество работ, описывающих сезонно-суточные изменения инфразвуковых шумов в разных частотных диапазонах и в различных регионах земного шара. В работе [3], где представлено суточное изменение энергии спектра в диапазоне частот 3,81–7,91 Гц, указывается на существование суточного изменения амплитуды на данных частотах, которые стационарны на коротких временных интервалах. В работе [4] описываются суточные изменения амплитуд инфразвуковых колебаний, которые заключаются в увеличении амплитуд в дневное время и уменьшении в ночное время суток. Сравнение полученной суточной динамики с данными измерений инфразвуковых колебаний в г. Антверпене (Бельгия) показало хорошее совпадение суточного хода. Форма суточной динамики сохраняется для всех сезонов года. Отмечается, что для зимнего периода форма суточного хода менее выражена. Это можно объяснить малым временем светового дня в зимнее время года. Авторы [4] описывают сезонное изменение амплитуд инфразвуковых колебаний от 0,4 до 22,5 Па. В работе [5] приводятся результаты измерений инфразвуковых шумов в диапазоне частот 0,1–1 Гц по данным измерений инфразвукометрическим комплексом СибИЗМИР СО АН СССР в 150 км к юго-западу от Иркутска. В представленном авторами годовом ходе инфразвуковых шумов наблюдается увеличение уровня шумов в зимнее время года.

Все эти исследования указывают на сезонные и суточные изменения инфразвукового фона в узких частотных диапазонах и не дают общего представления о динамике шумов во всем инфразвуковом диапазоне частот. В связи с этим целью данной работы является исследование сезонно-суточных вариаций спектральной плотности мощности инфразвукового фона в частотном диапазоне 0,01–32 Гц.

В Национальном исследовательском Томском государственном университете разработан и создан мобильный инфразвукометрический комплекс, предназначенный для регистрации микропульсаций атмосферного давления в диапазоне частот 0,01–50 Гц. Инфразвукометрический комплекс включает в себя измерительный модуль и центральную станцию. В качестве устройства преобразования акустических колебаний в электрические используется электретный микрофон МКЭ-3 с паспортной чувствительностью от 4 до 20 мВ/Па на частоте 1000 Гц. Предварительное

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2012 гг.», ГК № 16.518.11.7048.

усиление электрического сигнала производится в непосредственной близости от микрофона для уменьшения помеховых электрических сигналов и наводок. Активный фильтр нижних частот Чебышева пятого порядка обеспечивает частоту среза 50 Гц. Усилитель с перестраиваемым коэффициентом усиления дает возможность выбора оптимального режима сбора данных для конкретной метеорологической обстановки.

Регистрация фоновых инфразвуковых колебаний давления проводилась непрерывно в режиме мониторинга. Непрерывные ряды данных разбивались на 3-минутные интервалы, в которых рассчитывалась спектральная плотность инфразвуковых колебаний давления [3]. После преобразования Фурье каждая реализация электрического сигнала была переведена в амплитуды давления, при этом использовались калибровочные и амплитудно-частотные кривые для каждого инфразвукометрического модуля. Полученные амплитудные спектры разбивали на частотные полосы 0,01–1, 1–2, 2–4, 4–8, 8–16 и 16–32 Гц.

Для каждого диапазона частот в спектре флуктуаций спектральной плотности инфразвукового фона наблюдается ярко выраженная суточная периодика и менее выраженная полусуточная. Среднее значение суточной гармоники в зимние месяцы достигает величины 0,05 Па, летом 0,04 Па. Значение полусуточной гармоники ниже по сравнению с суточной, и среднее значение в зимнее время достигает величины 0,017 Па, в летнее 0,012 Па. Форма спектров за все исследуемое время очень схожа. Во всем инфразвуковом диапазоне частот наблюдаются гармоники с 12- и 24-часовым периодом. В зимнее время года уровень инфразвукового фона выше, составляющие с периодами 24 и 12 часов проявляются слабее, чем в летнее время (рис. 1, *а*). В летние месяцы в спектре флуктуаций спектральной плотности инфразвукового фона очень хорошо заметно и суточную и полусуточную составляющие спектра флуктуаций (рис. 1, *б*).

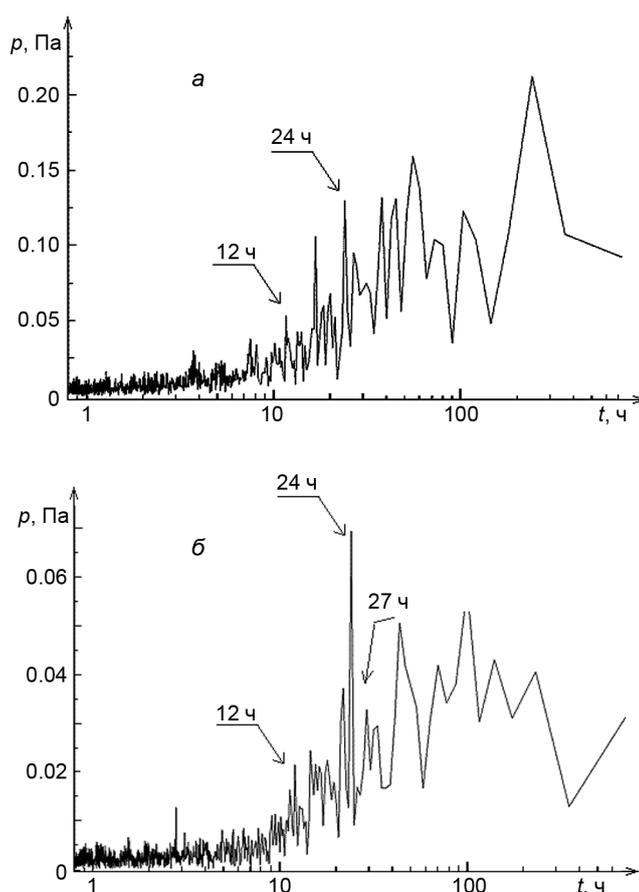


Рис. 1. Спектр флуктуаций спектральной плотности инфразвуковых шумов: *а* – зимнее время года; *б* – летнее время года

Ранее были описаны сезонно-суточные изменения микропульсаций атмосферного давления в диапазоне частот 0,01–1,6 Гц [6]. Для выявления суточных изменений интенсивности инфразвуковых шумов в диапазоне частот 0,01–1,6 Гц анализу были подвержены суточные ряды среднеквад-

ратичных отклонений амплитуд колебаний давления без учета АЧХ измерительной аппаратуры [6]. Данный анализ позволил выявить качественную картину суточного хода среднеквадратичного отклонения микропульсаций атмосферного давления в диапазоне частот 0,01–1,6 Гц. На рис. 2 представлен среднемесячный суточный ход среднеквадратичного отклонения для сентября 2000 г. Качественно форма суточного хода является характерной для всего анализируемого периода измерений исследуемого диапазона частот.

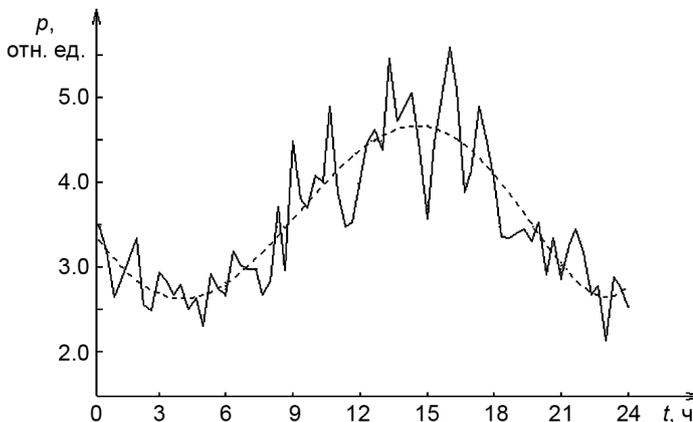


Рис. 2. Суточное изменение микропульсаций атмосферного давления в диапазоне частот 0,01–1,6 Гц

Для определения особенностей спектрального состава фоновых микропульсаций атмосферного давления был проведен анализ энергетических спектров для периода круглосуточных измерений с 01.11.2000 по 30.11.2000 г. Полный объем анализируемой выборки за указанный временной интервал составил порядка 2000 регистрограмм. При построении энергетических спектров использовалась цифровая фильтрация с шириной полосы пропускания в пол-октавы для выявления регулярных спектральных составляющих. Каждый энергетический спектр нормировался на собственную дисперсию. В результате были получены усредненный нормированный энергетический спектр для регистрограмм каждого измерительного модуля в отдельности (рис. 3, а) и усредненный нормированный взаимный энергетический спектр (рис.3, б).

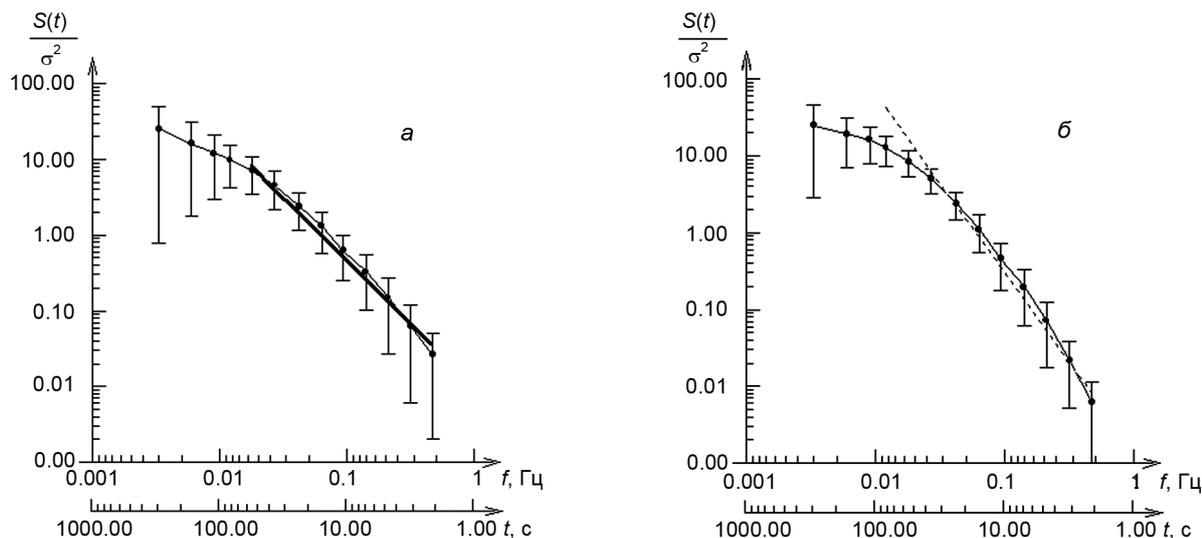


Рис. 3. Нормированный энергетический спектр регистрограмм одиночного измерительного модуля (а) и усредненный нормированный взаимный энергетический спектр (б)

Общая форма спектров не противоречит литературным данным [3–5]. Отличительной чертой взаимного энергетического спектра от спектра, рассчитанного по регистрограммам одиночного измерительного модуля, является более резкое падение амплитуд спектральных составляющих в области высоких частот, больших приблизительно 0,03 Гц. Зависимость амплитуды энергетического спектра, рассчитанного по регистрограммам одиночного измерительного модуля, от частоты аппроксимируется соотношением  $S(f) \approx f^{-\frac{5}{3}}$ . Данная зависимость связана с наличием в спектре так называемого «псевдозвука», причиной которого являются пульсации скорости ветровых потоков в месте измерений. Амплитуда взаимного энергетического спектра аппроксимируется соотношением

...

ем  $S(f) \approx f^{-7/3}$ . Таким образом, при вычислении взаимного энергетического спектра удается избежать влияния локальных флуктуаций давления в зоне расположения измерительных модулей.

В случае, когда в спектральном составе нет ярко выраженных характерных частот, наглядное представление распределения энергии по спектру можно получить, рассматривая энергию, приходящуюся на интервал частот, порядка самой частоты. На рис. 4 представлен усредненный взаимный энергетический спектр, рассчитанный по спектрам, умноженным на частоту спектральных составляющих и нормированным на собственную дисперсию. Характерной чертой данного спектра является наличие максимума в области периодов от 20 до 100 с, что согласуется с литературными данными.

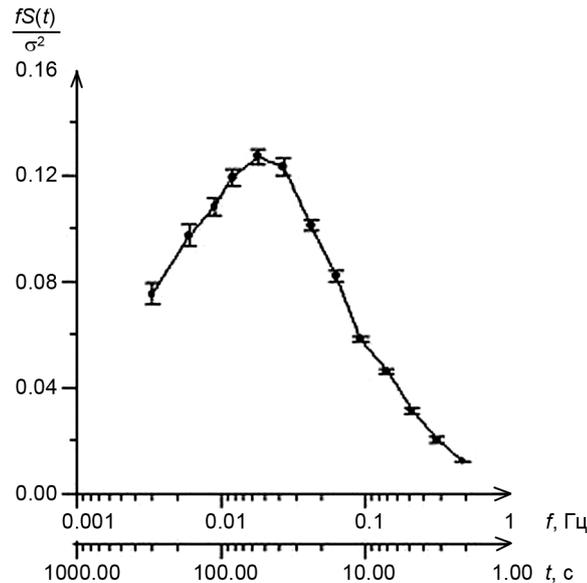


Рис. 4. Усредненный взаимный энергетический спектр

Для выявления временной устойчивости формы спектральной плотности инфразвукового фона воспользуемся эмпирической функцией

$$S(f) = Af^B. \quad (1)$$

Анализу методом наименьших квадратов были подвержены спектральные плотности фоновых микропульсаций атмосферного давления в диапазоне частот 0,01–1,6 Гц, для условий круглосуточных измерений с 01.01.2000 по 30.12.2001 г. В ходе анализа были выявлены суточные изменения коэффициентов функциональной зависимости, которые описывают суточное изменение уровня инфразвукового фона (рис. 5, а) и суточную трансформацию формы спектральной плотности (рис. 5, б). На данных рисунках представлены усредненные суточные изменения указанных параметров для периода измерений с 01.11.2000 по 30.11.2000 г. Усреднение производилось по ансамблю суточных реализаций коэффициентов аппроксимации, где среднее рассчитывалось по величинам, соответствующим каждому временному срезу суточных измерений.

Суточное изменение уровня инфразвукового фона в диапазоне частот 0,01–1,6 Гц сопровождается увеличением амплитуд флуктуаций в дневное время с максимумом приблизительно в 17 часов местного времени и уменьшением в ночное время. Суточная трансформация формы спектральной плотности сопровождается увеличением уровня высокочастотных составляющих спектра в дневное время суток с максимумом в 17 часов местного времени и уменьшением в ночное время с минимумом в 6 часов местного времени. Качественная картина суточного изменения параметров аппроксимации спектральной плотности является характерной для всего периода измерений.

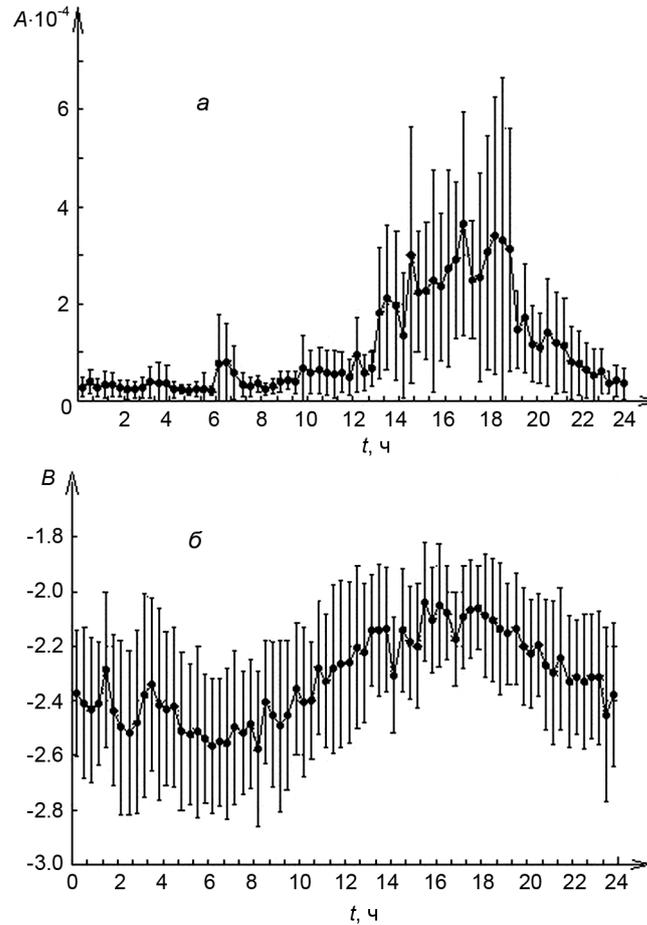


Рис. 5. Суточное изменение коэффициентов  $A$  (а) и  $B$  (б)

При исследовании закономерностей изменения амплитуд фоновых инфразвуковых колебаний давления в диапазоне частот 0,01–1,6 Гц из исследуемого набора данных инфразвукового мониторинга были исключены регистрограммы, во время которых наблюдалось действие импульсных источников инфразвука, например, таких, как грозовые явления. Затем для исключения флуктуаций давления с частотами выше 1,6 Гц к исходным данным была применена цифровая низкочастотная фильтрация. После этого для уменьшения локальных флуктуаций давления и так называемого «псевдозвука», связанного с порывами ветра, для каждого 5-минутного интервала измерений были рассчитаны взаимные спектры мощности  $W_{12}(f)$  :

$$W_{12}(f) = \frac{1}{T} S_1(f) S_2^*(f) A_1(f) A_2(f), \tag{2}$$

где  $S_1(f)$ ,  $S_2(f)$  – амплитудные спектры для первого и второго канала измерений;  $A_1(f)$ ,  $A_2(f)$  – амплитудно-частотные характеристики для первого и второго измерительного модуля;  $T$  – период измерений. Известно, что интегрирование  $W_{12}(f)$  по частоте позволяет получить общую мощность флуктуаций или дисперсию. Данный факт позволил получить среднеквадратичное отклонение микропульсаций атмосферного давления для каждого интервала измерений:

$$\sigma = \sqrt{\Delta f \sum_i W_{12}(f_i)}, \tag{3}$$

где  $\Delta f$  – частотный интервал между спектральными составляющими дискретного взаимного спектра мощности  $W_{12}(f)$ .

Анализ среднеквадратичных отклонений за исследуемый промежуток времени в диапазоне частот 0,01–1,6 Гц показал увеличение уровня шумов в зимние и уменьшение в летние месяцы (рис. 6).

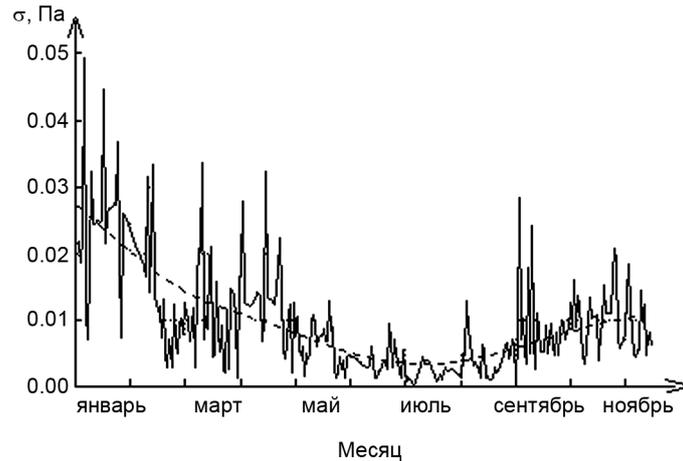


Рис. 6. Сезонное изменение среднеквадратичного отклонения микропульсаций атмосферного давления в диапазоне частот 0,01–1,6 Гц

Для расчета дисперсии микропульсаций атмосферного давления в диапазонах частот 1–2, 2–4, 4–8, 8–16 и 16–32 Гц использовалась вышеописанная методика. Отличие заключалось лишь в том, что для уменьшения объема информации дополнительно рассчитывались среднемесячные значения дисперсии микропульсаций атмосферного давления в указанных диапазонах частот, что информативно не искажает картину сезонного хода анализируемых параметров. Для выяснения повторяемости сезонных вариаций дисперсии микропульсаций атмосферного давления в рассматриваемых диапазонах частот были подвержены анализу непрерывные данные мониторинговых измерений инфразвуковых шумов за полный годовой цикл 2008 и 2011 гг.

Анализ сезонного изменения микропульсаций атмосферного давления за исследуемые годовые циклы показал, что во всех анализируемых частотных диапазонах наблюдаются сезонные изменения уровня инфразвукового фона. В качестве примера на рис. 7 показано сезонное изменение микропульсаций атмосферного давления в диапазоне частот 4–8 Гц за 2008 г. (рис. 7, а) и 2011 г. (рис. 7, б). Наиболее высокие значения микропульсаций атмосферного давления наблюдаются в зимние месяцы и достигают величин порядка 0,04 Па. В летние месяцы значения микропульсаций атмосферного давления гораздо ниже и находятся в пределах 0,01 Па.

Анализ годового цикла уровня инфразвуковых шумов, описываемых в микропульсациях атмосферного давления, во всех частотных диапазонах от 0,01 до 32 Гц показал увеличение уровня инфразвукового фона в зимние и уменьшение его в летние месяцы. Сезонное изменение уровня инфразвукового фона в диапазоне частот 0,01–32 Гц, измеренного в условиях города Томска, качественно совпадает с годовым ходом инфразвуковых шумов по литературным данным [2, 4].

Исследования сезонно-суточных изменений инфразвукового фона в диапазоне частот 0,01–32 Гц позволяют утверждать, что во всем инфразвуковом диапазоне частот наблюдаются сезонно-суточные изменения флуктуаций спектральной плотности инфразвуковых шумов. Во всем частотном диапазоне от 0,01 до 32 Гц в спектре флуктуаций спектральной плотности инфразвукового фона наблюдается ярко выраженная суточная периодика и менее выраженная полусуточная. Суточное изменение уровня инфразвукового фона сопровождается увеличением амплитуд флуктуаций в дневное время и понижением в ночное. Сезонная зависимость уровня инфразвукового фона в диапазоне частот от 0,01 до 32 Гц заключается в увеличении уровня шумов в зимние и уменьшении в летние месяцы. Сравнение полученных сезонно-суточных вариаций инфразвуковых шумов, измеренных в Томске, с литературными данными показал, что сохраняется их общая сезонно-суточная динамика. Данный факт позволяет предположить о схожих механизмах формирования инфразвукового фона.

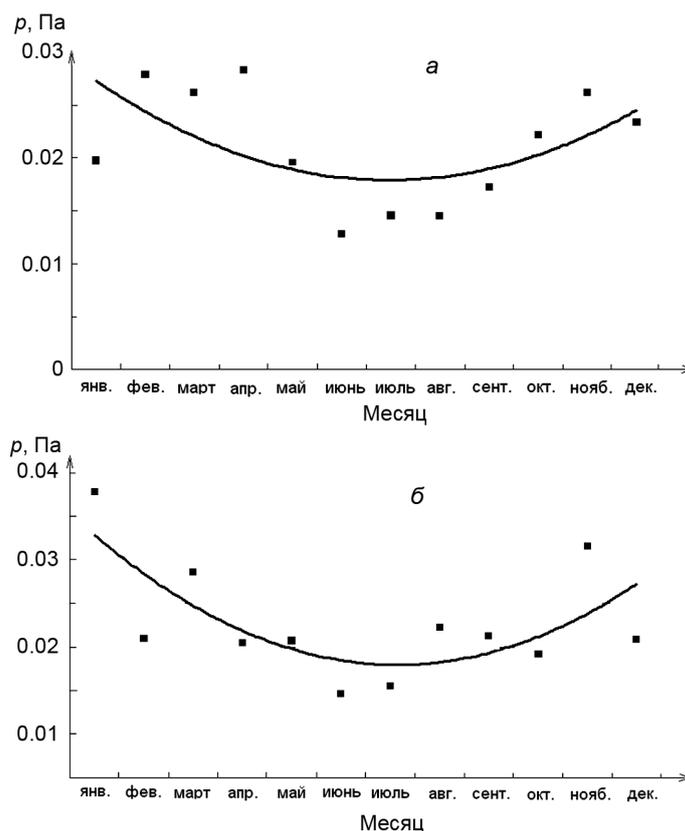


Рис. 7. Сезонное изменение флуктуаций спектральной плотности инфразвуковых шумов в диапазоне частот 4–8 Гц: *а* – 2008 г.; *б* – 2011 г.

В заключение следует отметить, что полученные результаты могут быть использованы в системе инфразвукового мониторинга, а также для построения модели сезонно-суточной динамики инфразвуковых шумов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куличков С. Н. // Изв. вузов. Физика атмосферы и океана. – 1989. – Т. 25. – № 7. – С. 688–694.
2. Колесник А.Г., Бородин А.С., Колесник С.А., Побаченко С.В. // Изв. вузов. Физика. – 2003. – Т. 46. – № 8. – С. 23–30.
3. Kimball B. A. and Lemon E. R. // J. Geophys. Res. – 1970. – V. 75. – No. 33. – P. 6771–6776.
4. Didyk L. A., Gorgo Yu. P., Dirckx J. J. J., et al. // Int J Biometeorol. – 2008. – No. 52. – P. 553–561.
5. Ерущенков А.И., Смирнов Н. А., Сорокин А. Г. // XI Всес. акустическая конф. – М., 1991. – С. 13–16.
6. Соловьев А.В., Тельпуховский Е.Д. // Изв. вузов. Физика. – 2002. – Т. 45. – № 8. – С. 63–65.

Национальный исследовательский  
Томский государственный университет, г. Томск, Россия  
E-mail: provotorov@sibmail.com

Поступила в редакцию 15.06.12.

Соловьев Андрей Вениаминович, к.т.н., доцент;  
Провоторов Денис Сергеевич, мл. науч. сотр., аспирант;  
Бочаров Александр Александрович, мл. науч. сотр., аспирант;  
Вознесенская Ксения Владимировна, мл. науч. сотр., аспирантка.