

*На правах рукописи*



**РЫЖКОВ Дмитрий Александрович**

**БАРИЧЕСКИЕ И МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ  
ПРОЦЕССЫ НА ГРАНИЦЕ  
ЗЕМНАЯ КОРА – АТМОСФЕРА**

Специальность 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Казань – 2011

Работа выполнена на кафедре радиофизики физического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

*Научный руководитель:*

доктор физико-математических наук, профессор  
Казанский федеральный университет  
Фахрутдинова Антонина Николаевна

*Научный консультант:*

кандидат технических наук  
НИИ математики и механики им. Н.Г. Чеботарева КФУ  
Биряльцев Евгений Васильевич

*Официальные оппоненты:*

доктор физико-математических наук, профессор  
Казанский государственный энергетический университет  
Белашов Василий Юрьевич

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник  
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
Гаврилов Анатолий Александрович

*Ведущая организация:*

Учреждение Российской академии наук «Институт динамики геосфер РАН»

Зашита диссертации состоится 24 февраля 2011 г. в 14 часов 30 минут в ауд. 1407 Института физики на заседании Диссертационного совета Д212.081.18 в ФГАОУВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского КФУ

Автореферат разослан 21 января 2011 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
д.ф.-м.н, профессор



А.В. Карпов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Объект исследования и актуальность темы

Атмосфера Земли – сложная динамическая система, в которой наблюдается широкий пространственно-временной спектр движений. Важным аспектом исследования термодинамических процессов атмосферы и сейсмических процессов в земной коре является поиск их взаимосвязи.

Исследование эффектов влияния солнечной активности на динамические процессы атмосферы и микросейсмические колебания поверхности Земли в настоящее время является актуальной темой и представляет большой интерес для ученых-геофизиков, климатологов и метеорологов. Наиболее оживленную дискуссию вызывают проявления солнечно-земных связей, которые определяют воздействие возмущений на Солнце и в межпланетной среде на состояние нижней атмосферы и микросейсмические процессы в земной коре.

Естественные микросейсмические колебания поверхности Земли (микросеймы) порождаются явлениями как природного характера (удаленные землетрясения, атмосферные явления, морской прибой), так и антропогенного (транспорт, промышленные объекты).

На основе явления повышенной низкочастотной энергии в спектре микросейм над нефтяными объектами разработана технология низкочастотного сейсмического зондирования (НСЗ) [1, 2], которая была запатентована в 2006 г. компанией ЗАО «Градиент». С 2005 г. технология НСЗ активно применяется на территориях республик Татарстан, Удмуртия, Коми, Калмыкия, а также Самарской, Оренбургской, Тюменской областей и Ямало-Ненецкого автономного округа для поиска нефтяных месторождений.

Солнечная активность и обусловленные ей возмущения межпланетной среды влияют на самые разнообразные процессы во всех оболочках Земли, включая магнитосферу, атмосферу, литосферу и биосферу [3].

Существует огромный ряд публикаций о влиянии солнечной активности на термодинамические параметры атмосферы [3, 4, 5]. Ряд публикаций, посвященных исследованию микросейсмических процессов [1, 2, 6], постоянно увеличивается, а работ, посвященных изучению взаимодействия термодинамических и микросейсмических процессов на границе атмосфера – земная кора, недостаточно для количественной оценки их связи, поскольку степень их взаимодействия в частотно-временной области различна.

В последнее десятилетие начинают появляться работы, посвященные влиянию атмосферного давления на микросейсмические процессы, поскольку вопрос об источниках микросейсм остается открытым. Методы для исследования нестационарных геофизических процессов активно развиваются, поэтому исследования в этом направлении являются актуальными на сегодняшний день.

**Целью диссертационной работы** является развитие методов исследования барических и микросейсмических процессов, а также оценка их связи на границе земной коры – атмосфера.

Исходя из указанной цели, поставлены следующие **задачи**:

1. Разработка и реализация метода выявления в пространстве однотипных зон нестационарных микросейсмических полей в заданной частотной области.
2. Проведение комплексного эксперимента с целью изучения влияния возмущений атмосферного давления в приземном слое атмосферы на микросейсмические колебания земной поверхности.
3. Разработка метода обнаружения и оценки локальной связи двух шумоподобных процессов для задачи обнаружения и оценки связи между барическими и микросейсмическими колебаниями в заданной частотно-временной области.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Разработан и реализован новый метод выявления в пространстве однотипных зон нестационарных микросейсмических полей в заданной частотной области.
2. Разработан и реализован новый метод обнаружения и оценки локальной связи двух шумоподобных процессов, основанный на статистической оценке характера распределения локальных разностей фаз их вейвлет-коэффициентов в заданной частотно-временной области.
3. С помощью разработанного метода обнаружения и оценки локальной связи двух шумоподобных процессов впервые выполнена оценка связи барических колебаний и вертикальной компонентой микросейсмических колебаний, наблюденных на границе земной коры – атмосфера.

**Практическая ценность работы.**

Результаты работы представляют интерес при построении общей модели солнечно-земных связей атмосфера и литосфера, при разработке методов поиска углеводородов (нефть и газ) в технологии низкочастотного сейсмического зондирования (НСЗ), а также при изучении земных климатических вариаций, обусловленных воздействием внешних сил.

### **На защиту выносится:**

1. Метод выявления в пространстве однотипных зон нестационарных микросейсмических полей в заданной частотной области.
2. Метод обнаружения и оценки локальной связи двух шумоподобных процессов, основанный на статистической оценке характера распределения локальных разностей фаз их вейвлет-коэффициентов в заданной частотно-временной области.
3. Результат оценки локальной связи между колебаниями атмосферного давления и вертикальной компонентой микросейсмических колебаний на границе земная кора – атмосфера.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается использованием статистических методов и полученных с их помощью оценок характеристик исследуемых параметров, применением регистрирующей аппаратуры, прошедшей метрологическую экспертизу, а также сравнением полученных результатов с результатами независимых исследований.

**Личный вклад автора.** Разработан и реализован новый метод выявления в пространстве однотипных зон нестационарных микросейсмических полей в заданной частотной области. Автор разработал методику проведения эксперимента по изучению взаимодействия возмущений атмосферного давления и микросейсмических колебаний на границе земная кора – атмосфера и участвовал в его проведении. Автором разработан и реализован новый метод обнаружения и оценки локальной связи двух шумоподобных процессов в заданной частотно-временной области для выявления связи между барическими колебаниями и вертикальной компонентой микросейсмических колебаний на границе земная кора – атмосфера.

**Апробация работы и публикации.** Основные положения и выводы диссертации опубликованы в 9 работах, в том числе в двух статьях в журналах, включенных в перечень ВАК («Технологии сейсморазведки» и «Ученые записки Казанского университета»). Результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на международных конференциях: «General Assembly – 2009», EGU (Вена, Австрия), «International Petroleum Technology Conference» (IPTC) (Doha, Qatar, 2009), X Гальперинские чтения «Инновационные технологии и фундаментальные исследования в наземно-скважинной сейсморазведке 2D, 3D, ВСП и сейсмологии, посвященная 90-летию Е.И.Гальперина» (Москва, 2010). А также на региональных конференциях: «Волновые процессы в средах» (Зеленодольск – Казань, 2007), «Радиофизические исследования природных сред и информационные системы» (Зеленодольск – Казань, 2008), «Радиофизические исследования природных сред и информационные

системы» (Зеленодольск - Казань, 2009), XVIII Губкинские чтения «Инновационное развитие нефтяной и газовой промышленности России: наука и образование» (Москва, 2009).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. В ней содержится 159 страниц печатного текста, приводится 93 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 150 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность и научная новизна темы, определяются цель и решаемые задачи, формулируются положения, выносимые на защиту, отмечается практическая значимость полученных результатов.

В **первой главе** проводится обзор исследований динамических процессов атмосферы, рассматривается влияние солнечной активности на их изменчивость, связь с сейсмическими процессами в земной коре. Излагаются основные современные научные представления о физической природе, закономерностях и свойствах исследуемых процессов.

Во **второй главе** приводится обзор и сравнительный анализ методов обработки сигналов для выявления связи между двумя геофизическими процессами. Рассматриваются и сравниваются два метода:

1. Классический метод оценки когерентности и сдвига фазы [7] на основе взаимных вейвлет-спектров;
2. Метод локальной разности фаз и локальной когерентности [8].

По результатам численного моделирования установлено, что вычисление разности фаз и когерентности целесообразней выполнять с помощью классического метода на основе взаимного вейвлет-спектра, алгоритм которого представлен далее.

Для двух временных рядов  $s_1$  и  $s_2$ , содержащих нестационарные флюктуации с различными периодами, можно определить взаимный вейвлет-спектр с комплексными вейвлет-преобразованиями  $\hat{\Psi}_1$  и  $\hat{\Psi}_2$  по формуле:

$$\hat{\Psi}_{12}(a, \tau) = \langle \hat{\Psi}_1(a, \tau) \cdot \hat{\Psi}_2^*(a, \tau) \rangle, \quad (1)$$

где  $a$  - временной масштаб вейвлета,  $\tau$  - текущее время наблюдения,  $*$  - оператор комплексного сопряжения,  $\langle \dots \rangle$  - оператор усреднения по времени. Спектральная мощность (энергия) взаимного вейвлет-спектра

задается как  $|\hat{\Psi}_{12}(a, \tau)|$ , а фазовый угол показывает фазовый сдвиг между рядами  $s_1$  и  $s_2$  в частотно-временной области. Используя понятие классической когерентности [7], можно рассчитать когерентность на основе взаимного вейвлет-спектра по формуле:

$$\gamma(a, \tau) = \frac{\langle \hat{\Psi}_1(a, \tau) \cdot \hat{\Psi}_2^*(a, \tau) \rangle}{\sqrt{\langle |\hat{\Psi}_1(a, \tau)|^2 \rangle \langle |\hat{\Psi}_2(a, \tau)|^2 \rangle}}, \quad (2)$$

где  $\langle \dots \rangle$  — оператор усреднения по времени  $\tau$  в интервале  $[\tau_0 - \Delta/2, \tau_0 + \Delta/2]$ ,  $\tau_0$  — центр временного окна,  $\Delta$  — ширина окна усреднения.

Когерентность (от лат. *cohaerentio* — связь, сцепление) — согласованное протекание в пространстве и во времени нескольких колебательных или волновых процессов, при котором разность их фаз остается постоянной.

Когерентность является мерой интенсивности ковариации двух временных рядов. Взаимный вейвлет-спектр является мерой совместной энергии.

В выражении (2) для когерентности усредненные коэффициенты вейвлет-преобразования  $\langle |\hat{\Psi}_1(a, \tau)|^2 \rangle$  и  $\langle |\hat{\Psi}_2(a, \tau)|^2 \rangle$  по смыслу есть интегральные вейвлет-преобразования с границами  $[\tau_0 - \Delta/2, \tau_0 + \Delta/2]$ , а  $\langle \hat{\Psi}_1(a, \tau) \cdot \hat{\Psi}_2^*(a, \tau) \rangle$  — взаимный вейвлет-спектр.

Интегральный вейвлет-спектр [9] для сегмента  $[t_1; t_2]$ , который характеризует распределение энергии по масштабам для конкретного участка исходного сигнала, можно записать в виде:

$$Sp(a) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} |\hat{\Psi}(a, \tau)|^2 d\tau \quad (3)$$

В дискретном представлении  $Sp(a)$  можно преобразовать к виду:

$$Sp(a) = \frac{1}{k_2 - k_1} \sum_{k=k_1}^{k_2} |\hat{\Psi}(a, \tau_k)|^2, \quad (4)$$

где  $\tau_k$  — дискретное время.

В связи с тем, что ширина вейвлет-функции меняется в зависимости от масштаба  $a$ , необходимо также менять ширину окна усреднения  $\Delta$ :

$$\Delta(a) = K_a \cdot a,$$

где  $K_a$  – число масштабов, участвующих в расчете когерентности.

Ширина весового окна материнского вейвлет-базиса и ширина окна усреднения  $\Delta$  кросс вейвлет-спектра полностью определяют ширину полосы в спектрах когерентности во временной и частотной областях.

На практике часто пользуются понятием квадрата модуля когерентности (КМК):

$$KMK(a, \tau_0) = |\gamma(a, \tau_0)|^2 \quad (5)$$

и фазы когерентности:

$$l_{12}(a, \tau_0) = \arg(\gamma(a, \tau_0)). \quad (6)$$

Фаза когерентности означает фазовый сдвиг между колебаниями с масштабом  $a$  в рядах  $s_1$  и  $s_2$ . Фаза  $l_{12}(a, \tau_0)$  относится только к локализованному базисной вейвлет-функцией временному интервалу.

Для локального спектрального анализа, а также сложных пространственных структур широко применяется комплексный вейвлет Морле, который обеспечивает хорошее разрешение в частотной области:

$$\bar{\Phi}(\tau) = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f_b}} \cdot \exp(i2\pi\tau f_c) \cdot \exp\left(-\frac{\tau^2}{f_b}\right), \quad (7)$$

где  $f_c$  – центральная частота вейвлета,  $f_b$  – параметр, отвечающий за частотную и временную избирательность вейвлета.

Указанный метод применялся к следующим экспериментальным данным: среднемесячным значениям солнечной активности (числа Вольфа), среднемесячным значениям температуры приземного слоя, полученным на метеостанции «Университет» ( $55^{\circ}47'$  с.ш.,  $49^{\circ}07'$  в.д.) (г. Казань) за период 1828–2010 гг., и среднемесячным значениям атмосферного давления приземного слоя, полученным на метеостанции «Университет» за период 1944–2010 гг.

В результате выполненных расчетов было установлено следующее:

1. В анализируемых временных вариациях среднемесячных значений температуры приземного слоя, полученных на метеостанции «Университет», и солнечной активности за период 1828–2010 гг. обнаружены периодичности с масштабами около 1, 5, 11 и 22 лет. Наиболее выраженной и устойчивой периодичностью, обусловленной циклом солнечной активности, является 11-ти летняя периодичность, которая подтверждается результатами независимых исследований. Произведена оценка статистических

- характеристик значений КМК для указанных параметров в диапазоне временных масштабов от 10 до 12 лет в интервалах времени наблюдения с 1847 по 1925 г. и с 1965 по 1975 г. Среднее значение КМК равно 0.8. Доверительный интервал значений КМК варьируется от 0.6 до 0.94 при уровне значимости  $\alpha = 5\%$ .
2. В анализируемых временных вариациях среднемесячных значений атмосферного давления приземного слоя, полученных на метеостанции «Университет», и солнечной активности за период 1944–2010 гг. обнаружены периодичности с масштабами около 2, 3, 5–7, 10 лет. Произведена оценка статистических характеристик значений КМК в диапазоне временных масштабов от 10 до 12 лет в интервалах времени наблюдения с 1988 по 1992 г. Среднее значение КМК равно 0.89. Доверительный интервал значений КМК варьируется от 0.81 до 0.92 при уровне значимости  $\alpha = 5\%$ .

В **третьей главе** проводится исследование нестационарных микросейсмических процессов. Исследуемым параметром является вертикальная компонента скорости колебаний земной поверхности. Резонанс продольных волн между дневной поверхностью и контрастными границами геологического разреза вызывает образование пиков в спектре микросейсмического сигнала на определенных частотах [1]. Принимая во внимание, что микросейсмические поля чувствительны к сейсмомеханическим характеристикам геологического разреза, анализ их характеристик можно использовать для изучения геологического разреза. Однако также известно [1], что микросейсмические сигналы нестационарны во времени.

Для решения задачи сравнения спектральных характеристик микросейсмического поля исследуемой территории разработан и реализован метод автоматического выявления в пространстве однотипных зон нестационарных микросейсмических полей на основе сопоставления распределений значений ранжированных спектральных амплитуд микросейсм в заданном диапазоне частот.

Поскольку микросейсмический процесс является нестационарным во времени, то в этом случае целесообразно применить ранговые статистики. Производится процедура ранжирования спектров: применяется построение ранговых спектров, имеющих свойства порядковых статистик [10, 11], а именно ранговые статистики инвариантны к операциям масштабирования и сдвига. Суть метода заключается в том, что значения амплитудного спектра каждого кадра упорядочиваются по возрастанию и заменяются на их порядковый номер. Применяя данный алгоритм, спектры кадров представляются в едином масштабе. Благодаря свойству масштабирования кратковременное усиление сигнала при сохранении формы спектра

кадра не вызывает отклонений в итоговом ранговом спектре; структура слабо выраженных аномалий в ранговом спектре становится более выразительной, а высокоамплитудные спектральные пики становятся менее выраженными. Благодаря свойству сдвига ранговый спектр снижает влияние аддитивного белого шума. Таким образом, в результате этих преобразований получается ранговый спектр микросейсмических колебаний, устойчивый по частотному составу и к изменениям интенсивности сигнала во времени.

Эти свойства важны для выделения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) геосреды из микросейсмических сигналов. Нивелирование неустойчивого характера интенсивности источников дает устойчивую картину морфологии спектра, характеризующую АЧХ среды.

Алгоритм метода делится на две части: 1) построение 2D гистограмм для каждой точки наблюдения; 2) определение степени подобия 2D гистограммы каждой точки наблюдения с опорной (шаблонной) 2D гистограммой.

Для построения 2D гистограммы анализируемый сигнал, длительностью 24 ч, разбивается на кадры (от 1 до  $N$ ) по 4096 отсчетов (40.96 с). Для каждого кадра вычисляется спектральная плотность мощности и выбирается только нужная часть спектра, определенная границами целевого частотного диапазона. Далее производится ранжирование выбранных частей спектров для каждого кадра. Для каждого отсчета выбранной части спектра строятся гистограммы распределений ранговых значений по всем спектрам суточной записи.

Далее гистограммы выкладываются параллельно друг другу, образуя 2D гистограмму, отображающую характер распределения ранговых значений спектров на каждой частоте отсчета спектра. Производится цветовое кодирование значений гистограммы. В результате получается изображение с равными сторонами – 2D гистограмма (рис.1). По вертикальной оси отложены отсчеты спектра (пересчитанные в частоты), по горизонтальной оси – значения рангов спектров, максимальное значение которых равно числу отсчетов.

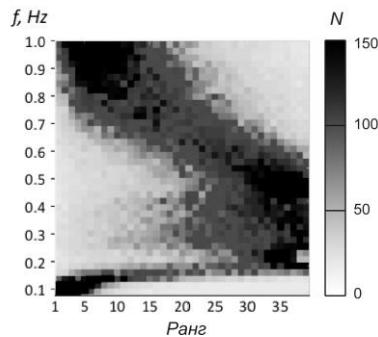


Рис. 1. Пример 2D гистограммы ранжированных спектров

Матрицу коэффициентов 2D гистограммы обозначим как  $\omega_k$ , где  $k$  – номер точки наблюдения.

Для опорного сигнала выполняются все вышеописанные действия, в результате которых получается 2D гистограмма  $\omega_{sh}$  (матрица коэффициентов) опорного (шаблонного) сигнала. 2D гистограммы  $\omega_k$  и  $\omega_{sh}$  определены для одного и того же диапазона частот.

Применение процедуры ранжирования позволяет рассматривать спектр каждого кадра с единым весом вне зависимости от уровня энергии кадра, что актуально для решения задачи выделения АЧХ среды при нестационарном характере фонового микросейсмического шума.

Степень подобия 2D гистограмм точки наблюдения с опорной вычисляется по формуле аналогичной формуле коэффициента корреляции Пирсона, но без вычитания среднего значения:

$$L_k = \frac{\sum \sum \omega_k(i, j) \cdot \omega_{sh}(i, j)}{\sqrt{\sum \sum \omega_k^2(i, j)} \cdot \sqrt{\sum \sum \omega_{sh}^2(i, j)}}, \quad (8)$$

где  $i$  – номер строки (соответствует определенной частоте из заданного диапазона частот),  $j$  – номер столбца (соответствует номеру кадра) в матрице коэффициентов 2D гистограммы. Так как значения  $\omega_k$  и  $\omega_{sh}$  не отрицательны, то  $0 < L_k \leq 1$ .

Подобное сопоставление производится для всех точек наблюдения на исследуемой площасти.

По результатам, полученным с помощью применения данного метода, строится карта, которая характеризует однотипные зоны распределения спектральных амплитуд сигналов физических точек наблюдения с опорным (шаблонным) распределением спектральных амплитуд.

Особенностью разработанного метода является построение 2D гистограмм, которые дают возможность представлять микросейсмический сигнал способом, отображающим характер распределения спектральных амплитуд (2D гистограммы), что увеличивает информативность спектрального представления микросейсмического сигнала и имеет практическое значение в технологии низкочастотного микросейсмического зондирования [1].

Данная методика была впервые применена в ЗАО «Градиент» на территории юго-восточного склона Северо-Татарского свода Волго-Уральской нефтегазоносной провинции.

В **четвертой главе** автором проводится исследование в области взаимодействия вариаций атмосферного давления и микросейсмических колебаний земной поверхности.

В спектре микросейсмического сигнала в диапазоне частот от 1 до 10 Гц наиболее ярко проявляются свойства геосреды [1], обусловленные слоистым тектоническим строением, где в качестве возможных естественных источников микросейсм могут быть барические возмущения. Поэтому представляет интерес оценка величины вклада барических возмущений в микросейсмический фон Земли.

Анализ результатов совместной регистрации сейсмических и барических вариаций разной периодичности, проведенный в работе [12], показывает, что вариации атмосферного давления вызывают заметные изменения характеристик микросейсмических колебаний. Барические возмущения в атмосфере, сопутствующие таким метеорологическим явлениям как циклоны, длительностью от 12 ч до нескольких суток, вызывают повышение сейсмического фона в длиннопериодной части спектра (около 0.03-1 Гц) в основном за счет штормовых явлений. Барические возмущения в атмосфере длительностью 5-30 мин, связанные с прохождением холодных атмосферных фронтов, вызывают повышенные амплитудные флюктуации микросейсмического фона около 4-8 Гц.

При перемещении холодных фронтов барические тенденции по обе стороны фронта различаются либо по знаку, либо, при одинаковом знаке, по величине. За фронтом обычно давление растет, перед фронтом - падает.

В условиях повышенной запущленности микросейсмического сигнала техногенными источниками, методы анализа связи барических и микросейсмических процессов в амплитудной области являются неэффективными для анализа в диапазоне частот 1-10 Гц. Поэтому для оценки вклада барических возмущений в микросейсмический фон Земли доктором физико-математических наук предлагается разработанный метод, основанный на статистической оценке формы распределения локальных разностей фаз вейвлет-коэффициентов двух исследуемых сигналов в частотно-временной области.

На основании выше изложенного в компании ЗАО «Градиент» по предложению автора докторской диссертации был проведен комплексный эксперимент в целях исследования связи барических возмущений и микросейсмического фона Земли. Эксперимент включал в себя полевые наблюдения и реализацию предложенного метода анализа связи двух исследуемых процессов.

Точка наблюдения с координатами (54°42'20" с.ш., 53°6'38" в.д.) в физико-географическом отношении приурочена к Восточному Закамью, в пределах Бугульминско-Белебеевской возвышенности. В

тектоническом плане район исследования приурочен к восточному склону Южно-Татарского свода Волго-Уральской нефтяной провинции. Наблюдения велись с 29 июля по 22 августа 2010 года. Анализируемым параметром микросейсмических колебаний является вертикальная компонента скорости колебаний земной поверхности.

На основе линейной множественной регрессии с помощью имитационного моделирования строится модель регистрируемых микросейсмических колебаний:

$$\Psi = \alpha \cdot \xi + (1 - \alpha) \cdot \eta, \quad (9)$$

где  $\xi = \xi(t)$  - модель сигнала атмосферного давления,  $\eta = \eta(t)$  - модель сигнала микросейсмических колебаний, независящих от давления,  $\alpha$  - коэффициент преобладания микросейсмических колебаний, вызванных вариациями атмосферного давления, над микросейсмическими колебаниями, несвязанных с атмосферным давлением (далее  $\alpha$  - коэффициент связи).

Генерируются два гауссовых процесса  $\xi(t)$  и  $\eta(t)$  ( $t$  принимает значения от 1 до 250000000 отсчетов с шагом 1), имеющих нормальное распределение с математическим ожиданием  $m=0$  и стандартным отклонением  $\sigma=1$ .  $\alpha$  принимает значения от 0 до 1 с шагом 0.1. Сигналы  $\xi(t)$  и  $\eta(t)$  разбиваются на кадры  $k$  (всего 10000 кадров). Размер кадра выбирается в зависимости от частоты  $f$  таким образом, чтобы в нем укладывалось 100 полупериодов вейвлет-коэффициентов анализируемых сигналов. Для каждого значения  $\alpha$ ,  $f$  и  $k$  строятся  $\Psi = \Psi(\alpha, f, k)$  по формуле (9).

На первом этапе с помощью метода оценки когерентности [7] на основе взаимных вейвлет-спектров выполняется вычисление разности фаз  $\phi(\alpha, f, k)$  вейвлет-коэффициентов сигналов  $\Psi(\alpha=1, f, k)$  и  $\Psi = \Psi(\alpha, f, k)$  в диапазоне частот от 0.2 до 10 Гц с шагом 0.2 Гц по кадрам для каждого анализируемого частотного диапазона.

На следующем этапе выполняется процедура построения гистограмм  $\omega(\alpha, f, k) = \omega(\phi(\alpha, f, k))$  вычисленных разностей фаз  $\phi(\alpha, f, k)$  вейвлет-коэффициентов сигналов  $\Psi(\alpha=1, f, k)$  и  $\Psi = \Psi(\alpha, f, k)$ .

Далее вычисляется коэффициент подобия  $L(\alpha, f, k)$  накопленной гистограммы (за 10000 кадров)  $\omega(\alpha=1, f)$  и гистограммы  $\omega(\alpha, f, k)$  по следующей формуле:

$$L(\alpha, f, k) = \frac{\sum_i \omega_i(\alpha, f, k) \cdot \omega_i(\alpha=1, f)}{\sqrt{\sum_i \omega_i^2(\alpha, f, k)} \cdot \sqrt{\sum_i \omega_i^2(\alpha=1, f)}}. \quad (10)$$

По общему количеству кадров в зависимости от  $\alpha$  и частоты строятся гистограммы  $\omega(L(\alpha, f))$  параметра  $L(\alpha, f, k)$ , по которым вычисляются наиболее вероятные значения оценки  $\hat{L}(\alpha, f)$ . Интерполируя зависимость  $\hat{L}(\alpha, f)$  от  $\alpha$  и частоты  $f$ , можно получить зависимость  $\alpha(L, f)$  от  $L$  и  $f$ .

Далее вычисляется коэффициент подобия  $L_r(f, k)$  накопленной (за 10000 кадров) модельной гистограммы  $\omega(\alpha=1, f)$  и гистограммы  $\omega_r(f, k)$  экспериментальных значений по формуле (10). Подставляя  $L_r(f, k)$  в  $\alpha(L, f)$ , вычисляется оценка  $\hat{\alpha}_r$  в зависимости от частоты для каждого кадра. По гистограммам  $\omega(L(\alpha, f))$  параметра  $L$  при заданном уровне значимости  $\varepsilon = 5\%$  оценивается нижняя  $\hat{\alpha}_{\frac{\varepsilon}{2}}(f, L)$  и верхняя

граница  $\hat{\alpha}_{\frac{100-\varepsilon}{2}}(f, L)$  интервала значений  $\hat{\alpha}_r$  в зависимости от частоты  $f$  и параметра  $L(f, k)$ .

С помощью разработанного метода обнаружения и оценки локальной связи барических и микросейсмических колебаний в северо-восточной части Ютазинского района Республики Татарстан в точке наблюдения с координатами ( $54^{\circ}42'20''$  с.ш.,  $53^{\circ}6'38''$  в.д.) в период наблюдения с 29.07.2010 по 22.08.2010 г. установлено, что во время проявления барических возмущений со среднеквадратическим отклонением порядка 10 мбр/с, особенно в те моменты времени, когда влияние техногенных помех на микросейсмы минимально, в частотных диапазонах 1-4 Гц и 8-10 Гц доля микросейсм, связанная с влиянием атмосферного давления, в точке проведения эксперимента лежит в диапазоне 25-32% с оценкой вероятности ошибки 5%. Анализ полученных результатов показывает, что в ночное время наблюдения (с 22:00 до 8:00 ч.) микросейсмическая обстановка территории исследования является более спокойной в отличие от дневного времени наблюдения (с 8:00 до 22:00 ч.), в течение которого микросейсмический сигнал зашумляется помехами техногенного характера (движущимся транспортом, работой машин, сельскохозяйственной техникой, скважинного оборудования и др.).

**В заключении** сформулированы основные выводы, полученные в данной диссертационной работе:

1. Разработан и реализован новый метод выявления в пространстве однотипных зон нестационарных микросейсмических полей в заданной частотной области. Метод основан на сопоставлении распределений ранжированных спектральных амплитуд, где один из

- сравниваемых сигналов является опорным (зарегистрированный в точке наблюдения с известной геологической информацией). Предлагаемый метод увеличивает информативность спектрального представления микросейсмического сигнала, поскольку по предлагаемой методике отображается характер распределения спектральных амплитуд микросейсм. Метод имеет практическое применение при типизации спектров в технологии низкочастотного сейсмического зондирования (НСЗ) при поиске углеводородов (нефть, газ).
2. Разработан и проведен специальный комплексный эксперимент по исследованию взаимодействия барических и микросейсмических колебаний в период времени с 29 июля по 22 августа 2010 года в точке наблюдения с координатами  $54^{\circ}42'20''$  с.ш.;  $53^{\circ}6'38''$  в.д., выбранной исходя из оптимальных условий для наблюдения с учетом уровня техногенных помех. Выполнены наблюдения барических и микросейсмических колебаний, одновременно зарегистрированные с частотой дискретизации 100 Гц. Использованная аппаратура и выбранная дискретизация записи позволили исследовать спектр колебаний в диапазоне от 0.2 до 10 Гц.
  3. Разработан и реализован новый метод обнаружения и оценки локальной связи двух шумоподобных процессов, основанный на статистической оценке характера распределения локальных разностей фаз их вейвлет-коэффициентов в заданной частотно-временной области.
  4. Реализованный метод и проведенные исследования позволили установить, что в моменты проявления барических возмущений (со среднеквадратическим отклонением порядка 10 мбр/с) в частотных диапазонах 1-4 Гц и 8-10 Гц доля микросейсм, обусловленная влиянием атмосферного давления, лежит в диапазоне 25-32% с оценкой вероятности ошибки 5%. Установленный факт свидетельствует о том, что на исследуемой территории барические возмущения могут быть одним из определяющих источников микросейсм, участвующих в формировании отклика амплитудно-частотной характеристики геосреды. Данный факт необходимо учитывать при анализе микросейсмических записей в технологии низкочастотного микросейсмического зондирования (НСЗ) при поиске углеводородов (нефть, газ).

**Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:**

*Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Биряльцев, Е.В. Моделирование эффекта АНЧАР в методе низкочастотного сейсмического зондирования [Текст] / Е.В. Биряльцев, А.А. Вильданов, Е.В. Еронина, В.А. Рыжов, Д.А. Рыжов, Н.Я. Шабалин // Технологии сейсморазведки. – М.: Изд-во Спектр, 2010. – № 1. – С. 31-40.
2. Рыжов, Д.А. Солнечные эффекты в вариациях приземного температурного поля [Текст] / Д.А. Рыжов, А.Н. Фахрутдинова, Ю.П. Переведенцев // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. Науки. – 2010. – Т. 152, кн. 3. – С. 238-250.

*Публикации в других научных изданиях:*

3. Рыжов, Д.А. Внутрисуточные колебания в поле температуры, зонального и меридионального ветров на высотах тропосфера-нижней стратосферы [Текст] / Д.А. Рыжов, А.Н. Фахрутдинова // Сборник докладов Поволжской региональной молодежной конференции «Волновые процессы в средах». – Казань.: Изд-во Казанск. гос. ун-та, 2007. – С. 25-28.
4. Рыжов, Д.А. Солнечные эффекты в поле термического суточного прилива зональной и меридиональной циркуляции [Электронный ресурс] / Д.А. Рыжов, А.Н. Фахрутдинова // Сборник докладов Волжской региональной молодежной научной конференции «Радиофизические исследования природных сред и информационные системы». – Казань-Зеленодольск, 2008. – С. 32-35. – Электрон. опт. диск (CD-ROM).
5. Рыжов, Д.А. Солнечные эффекты в вариациях гравитационных волновых возмущений приземного слоя [Текст] / Д.А. Рыжов, А.Н. Фахрутдинова // Сборник докладов Второй Волжской региональной молодежной научной конференции «Радиофизические исследования природных сред и информационные системы». – Казань-Зеленодольск, 2009. – С. 71-75.
6. Birialtsev, E. Theoretical aspects and the experience of studying spectra of low- frequency microseisms [Electronic resource] / E. Birialtsev, A. Vildanov, E. Eronina, D. Rizhov, V. Rizhov, I. Sharapov // EGU General Assembly 2009, Vol. 11, EGU2009-7736-4, 2009. – Электрон. опт. диск (CD-ROM) (URL: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2009/EGU2009-7736-4.pdf>).

7. Биряльцев, Е.В. Опыт использования спектрального анализа микросейсм при поисках и разведке залежей природных углеводородов [Текст] / Е.В. Биряльцев, Н.Я. Шабалин, А.А. Вильданов, Е.В. Еронина, В.А. Рыжов, Д.А. Рыжов, Р.И. Хуснуллин // Тезисы докладов XVIII Губкинских чтений. Инновационное развитие нефтяной и газовой промышленности России: наука и образование. - Москва, 2009. - С. 147-148.
8. Birialtsev, E. Experience in Low-Frequency Spectral Analysis of Passive Seismic Data in Volga-Ural Oil-Bearing Province [Electronic resource]/ E. Birialtsev, E. Eronina, N. Shabalin, D. Rizhov, V. Rizhov, A.A. Vildanov // International petroleum technology conference (IPTC), Doha, Qatar, 2009. – IPTC 13678 – Р. 1-11. – Электрон. опт. диск (CD-ROM).
9. Биряльцев, Е.В. Низкочастотные микросейсмические исследования во временной области при разведке на залежи углеводородов [Текст] / Е.В. Биряльцев, В.А. Рыжов, Д.А. Рыжов, И.Р. Шарапов // Сборник тезисов Юбилейной X ежегодной международной конференции Гальперинские чтения. Инновационные технологии и фундаментальные исследования в наземно-скважинной сейсморазведке 2D, 3D, ВСП и сейсмологии, посвященная 90-летию Е.И. Гальперина. – Москва, 2010. – С. 150-154.

#### **Список используемой литературы:**

1. Биряльцев, Е.В. Моделирование эффекта АНЧАР в методе низкочастотного сейсмического зондирования [Текст] / Е.В. Биряльцев, А.А. Вильданов, Е.В. Еронина, В.А. Рыжов, Д.А. Рыжов, Н.Я. Шабалин // Технологии сейсморазведки. – Москва.: Изд-во Спектр, 2010. – № 1. – С. 31-40.
2. Биряльцев, Е. В. Параметры полезного сигнала низкочастотного сейсмического зондирования при поиске залежей углеводородных флюидов [Текст] / Е. В. Биряльцев, В. А. Кипоть, В. А. Рыжов, О. Н. Шерстюков // Доклады научной конференции «Актуальные проблемы естественных и гуманитарных наук». – Казань: Изд-во Казанск. гос.ун-та, 2006. – С. 28-30.
3. Пудовкин М.И. Механизм воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры [Текст] / М.И. Пудовкин, О.М. Распопов // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32. – № 5. – С. 1-32.
4. Монин А.С. Прогноз погоды как задача физика [Текст]. – М.: Наука, 1969. – 184 с.
5. Пудовкин М.И. Эффекты солнечных вспышек в вариациях приземного давления атмосферы [Текст] / М.И. Пудовкин, С.В. Бабушкина // Геомагнетизм и аэрономия. – 1990. – Т. 30. – № 3. – С. 469-473.

6. Goloshubin G. Reservoir imaging using low frequencies of seismic reflections [Text] / G. Goloshubin, V. Korneev, D. Sulin // The Leading Edge, – 2006, – p 527-531.
7. Марпл, С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения [Text]. – Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
8. Безверхний В.А. Развитие метода вейвлет-преобразования для анализа геофизических данных [Текст] // Изв. РАН. ФАО. – 2001. – Т.37. – №5. – С. 630-638.
9. Чун, Ч.К. Введение в вейвлеты [Текст]. – Пер. с англ. / Ч.К. Чун. – Москва: Мир, 2001. – 412 с.
10. Боярский Э.А. Порядковые статистики [Текст]. - М.: Статистика, 1972. – 120 с.
11. Дэйвид, Г. Порядковые статистики [Текст] // Главная редакция физико-математической литературы. – М.: Наука, 1979. – 336 с.
12. Адушкин В.В. Влияние барических возмущений атмосферы на микросейсмические процессы в земной коре [Текст] / Адушкин В.В., А.Н. Локтев, А.А. Спивак // Физика Земли. – 2008. – № 6. – С. 77-85.