

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРЕЖЕННОЙ АППРОКСИМАЦИИ И МЕТОДОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СТРУКТУРЫ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Афанасьева А.А., аспирантка, Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН;

Луковенкова О.О., аспирантка, Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН;

Маранулец Ю.В., к.т.н., Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, e-mail: marpl@ikir.ru

Тристанов А.Б., к.т.н., Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, e-mail: alextristanov@mail.ru

Ключевые слова: акустическая эмиссия, геоакустический сигнал, частотно-временной анализ, разреженная аппроксимация, алгоритм согласованного преследования.

Введение

Акустическая эмиссия в твердых телах представляет собой упругие колебания, возникающие в результате дислокационных изменений в среде. Характеристики возбуждаемого при этом импульсного излучения непосредственно связаны с особенностями пластических процессов, чем и обусловлен интерес к исследованиям эмиссии с целью развития методов акустической диагностики сред. В настоящее время широко используются инфра- и ультразвуковой диапазоны частот, первый для изучения сейсмического процесса, второй – прочности материалов. Исследования на Камчатке показали эффективность применения акустических методов диагностирования природных сред на масштабах, соответствующих длинам волн звуковых колебаний [1, 2]. Выявлена связь между активизацией деформационных процессов и поведением акустической эмиссии, в том числе в период перед землетрясением [1-4].

Анализ акустического сигнала показывает, что он состоит из серии релаксационных колебаний (импульсов) различной амплитуды и длительности, с ударным возбуждением и частотой заполнения от сотен герц до десятков килогерц. Частота следования импульсов определяется деформациями пород и может меняться в широких пределах – от одиночных сигналов на временном интервале несколько секунд, в спокойный период, до десятков и даже сотен в секунду, в моменты аномалий перед землетрясениями [2, 5]. Наиболее информативная часть импульса: фронт и начало спада, обычно длительностью до 25 мс и отношением сигнал/шум до 30 раз, позволяет определить направление на источник [2, 5], а частоты заполнения содержат информацию о его размерах и динамике [1, 2]. Поэтому частотно-временной анализ геоакустических сигналов очень важен для исследования источников эмиссии и, в конечном итоге, для диагностики особенностей пластического процесса. Но, несмотря на разнообразие существующих частотно-временных методов (оконное преобразование

Для частотно-временного анализа акустической эмиссии звукового диапазона частот применен метод разреженной аппроксимации с новым базисным словарем, основанным на функциях Берлаге. Предложен алгоритм обнаружения акустических импульсов, построенный на методах разреженной аппроксимации и кластеризации.

Фурье, вейвлет-преобразование, вейвлет-пакеты и т.д.) задача такого анализа импульсных геоакустических сигналов до настоящего времени не решена. В работе [6] для анализа геоакустических импульсов в звуковом диапазоне было предложено использовать разреженную аппроксимацию. Применение алгоритма согласованного преследования с использованием словаря Габора выявило возможность анализировать внутреннюю структуру геоакустических сигналов.

Разреженная аппроксимация.

Алгоритм согласованного преследования

Под аппроксимацией сигнала понимается задача представления сигнала в виде суперпозиции некоторого набора функций из наперед заданного словаря (семейства функций):

$$f(t) = \sum_{m=0}^{N-1} a_m g_m(t) + R_N$$

$$\|R_N\| \rightarrow \min,$$

где $f(t)$ – исследуемый сигнал, $g_m(t)$ – элемент (атом) словаря $D = \{g_m(t), \|g_m\|=1\}$, a_m – коэффициенты разложения, N – количество элементов разложения, R_N – ошибка аппроксимации.

Разреженная аппроксимация предполагает построение модели сигнала, содержащей наименьшее число элементов, т.е.

$$f(t) = \sum_{m=0}^{N-1} a_m g_m(t) + R_N$$

$$\|R_N\| \rightarrow \min$$

$$\|a_m\|_0 \rightarrow \min,$$

где $\|\cdot\|_0$ – псевдонорма, равная числу ненулевых членов вектора.

Выбор базиса разложения существенно влияет на качество аппроксимации. Выделяют два предельных случая [7]:

– идеальный базис, один из элементов которого пропорционален анализируемому сигналу $f(t) = k \cdot g_p(t)$, $k \in C$, т.е. ошибка аппроксимации становится равной нулю на первой итерации, $R_1 = 0$; рассеянный базис, равномерно распределяющий энергию сигнала по всем векторам $\langle f, g_m \rangle = \frac{\|f\|^2}{N}$, т.е.

ошибка аппроксимации равномерно спадает на каждой итерации.

Любой базис хуже, чем идеальный и лучше, чем рассеянный, для аппроксимации сигнала $f(t)$.

Как правило, методы разреженной аппроксимации используются для разложения сигналов в избыточных словарях. Под избыточным понимается словарь, содержащий количество атомов, много большее размерности исходного сигнала. Задача поиска оптимального базиса разложения, содержащего наименьшее количество ненулевых элементов и одновременно минимизирующего ошибку аппроксимации, в избыточном словаре обладает большой вычислительной сложностью.

Для решения данной задачи применяют алгоритмы, дающие субоптимальное решение. Одним из таких является алгоритм согласованного преследования [7, 8], предложенный Mallat S. и Zhang Z. Суть алгоритма сводится к итерационному процессу поиска элементов словаря, минимизирующих на каждом шаге ошибку аппроксимации

$$\begin{cases} R^0 f = f \\ R^n f = \langle R^n f, g_{\gamma_n} \rangle g_{\gamma_n} + R^{n+1} f \\ g_{\gamma_n} = \arg \left[\max_{g_{\gamma_i} \in D} \left| \langle R^n f, g_{\gamma_i} \rangle \right| \right]. \end{cases}$$

В данной работе использовался двухшаговый алгоритм согласованного преследования. На первом шаге выделяется атом из базового (грубого) словаря, затем строится словарь в окрестности выделенного атома. Данная процедура позволяет работать со словарями достаточно большого объема в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Словарь Берлаге

Выбор словаря D является важной задачей, от которой зависит качество дальнейшего анализа. Предыдущие работы [6, 9] показали, что применение словаря состоящего из модулированных функций Гаусса (импульсов Габора) не во всех случаях является эффективным, несмотря на то, что импульс Гаусса позволяет достичь высокого частотно-временного разрешения.

В качестве основного недостатка использования модулированных функций Гаусса можно заметить, что они обладают свойством симметричности относительно максимума огибающей, что в целом не соответствует форме элементарных геоакустических импульсов, в которых фронт намного короче спада. В связи с этим, особый интерес вызывает изучение словарей, атомы которых имеют сходство с элементарными морфологическими компонентами самого сигнала, например, импульсы Берлаге $Ber = At^n e^{-at} \sin(2\pi ft)$ (рис. 1).

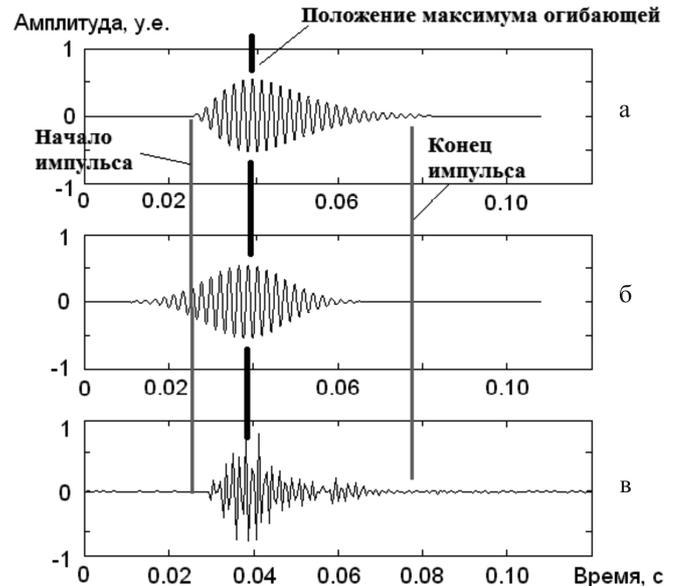


Рис. 1. Примеры импульсов Берлаге (а), Гаусса (б) и реального сигнала геоакустической эмиссии (в)

Отметим, что импульс Берлаге не обладает лучшей, по сравнению с импульсом Габора, частотно-временной локализацией и, в принципе, может быть разложен в бесконечную последовательность импульсов Габора. Но, принимая в качестве модели элементарного импульса акустической эмиссии импульс Берлаге, можно минимизировать словарь, что может привести к существенной экономии вычислительных ресурсов. Т.е. для достижения одинаковой ошибки аппроксимации сигналов акустической эмиссии, при прочих равных условиях, требуется словарь Габора большего объема, чем словарь Берлаге. Построение словаря, включающего импульсы Берлаге с непрерывно меняющимися значениями параметров, является невыполнимой задачей, поэтому был построен конечный словарь, включающий импульсы, параметры которых соответствуют разнообразию исследуемых геоакустических сигналов. Управляемыми параметрами словаря, определяющими его объем, являются: длительность импульса, положение максимума огибающей импульса и скорость нарастания переднего фронта. Данные параметры наиболее информативны для дальнейшей интерпретации результатов.

На рис. 2 показан пример использования алгоритма согласованного преследования со словарем Берлаге на фрагменте записи акустической эмиссии, включающей три импульса. Частотно-временные структуры импульсов различаются, поэтому можно считать, что они от трех независимых источников.

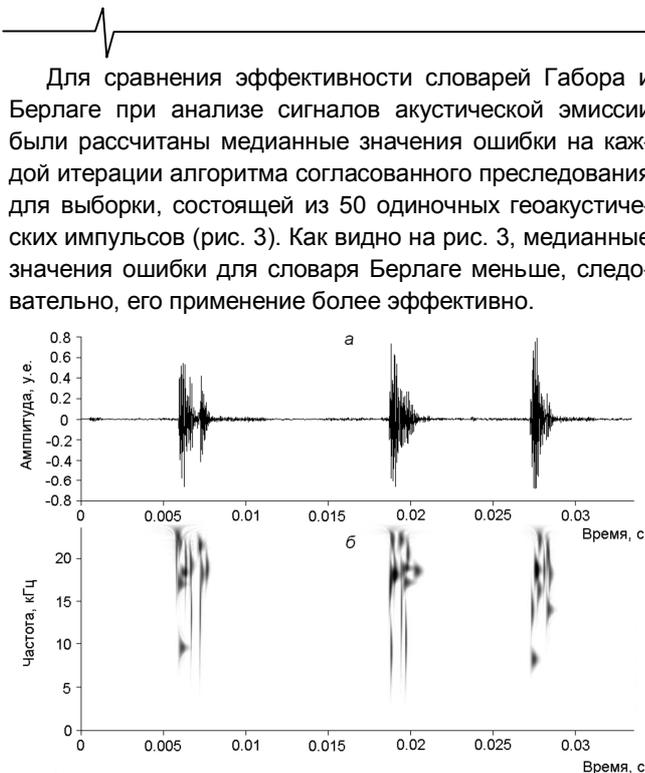


Рис. 2. Геоакустические импульсы (а) и их разложение методом разреженной аппроксимации (б)

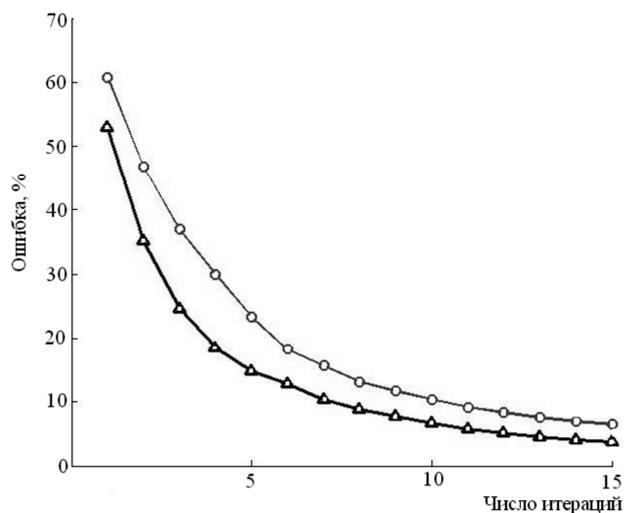


Рис. 3. Медианные значения ошибки аппроксимации для словаря Габора (линия с круглыми маркерами) и словаря Берлаге (линия с треугольными маркерами)

Алгоритм обнаружения импульсов геоакустической эмиссии

Ошибка аппроксимации спадает быстрее для участков сигнала, содержащих импульсы, а само разложение является описанием их структуры. Таким образом, особая динамика ошибки аппроксимации является характерным признаком наличия импульса в сигнале.

Предобработка сигнала заключается в нормировании, центрировании и фильтрации сигнала в диапазоне 1-48 кГц. Фильтрация позволяет очистить сигнал от техногенных наводок и помех, имеющих место в регистрирующем тракте.

Следующим этапом является поиск правил для обнаружения импульсов. Признаковое пространство дан-

ной задачи классификации образовано относительными значениями ошибки метода согласованного преследования при аппроксимации участков сигнала длительностью 8 мс 15 атомами словаря Берлаге. Рассмотрены сигналы, регистрируемые в разные дни, и сформирована обучающая выборка, состоящая из 1000 объектов класса «Импульс есть» и 1000 объектов класса «Импульса нет» (рис. 4). Следует отметить, что для построения выборки использовались наиболее характерные импульсы, амплитуда которых превышала амплитуду шума не менее, чем в 3 раза.

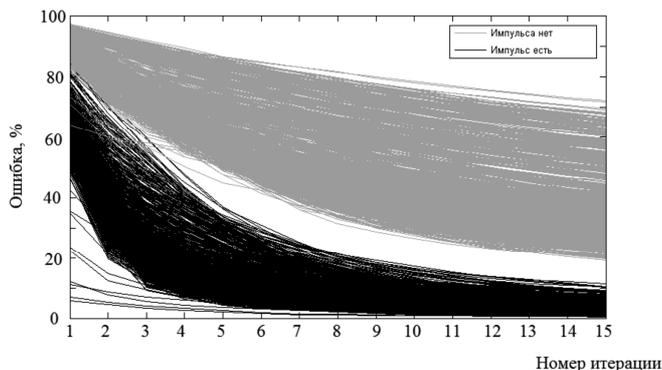


Рис. 4. Обучающая выборка

Поиск решающих правил осуществлялся тремя способами.

1. Построение дерева решений

На основе обучающей выборки с помощью функций StatisticsToolbox среды MATLAB было построено бинарное дерево решений, представленное на рис. 5. Заметим, что в данном случае характерным признаком является ошибка на 4-й итерации.



Рис. 5. Дерево решений

2. Граница областей

Как видно из рис. 4, графики спада ошибок объектов класса «Импульс есть» и объектов класса «Импульса нет» сгруппированы в различных областях координатной плоскости, следовательно, возможно построить линию, четко разграничивающую данные области, и классифицировать неизвестный объект по положению графика спада ошибки относительно полученной линии (рис. 6).

3. Центры классов

Если представить график спада ошибки каждого объекта обучающей выборки как элемент 15-мерного пространства, то для каждого из множеств «Импульс есть» и «Импульса нет» можно рассчитать центральный элемент, и класс неизвестного объекта определять по степени близости его точки в пространстве к центральным элементам.

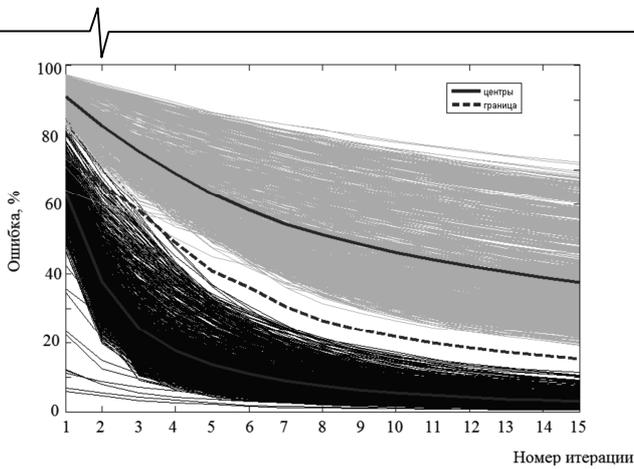


Рис. 6. Граница областей и центры классов

Решающие правила были протестированы на 5023 неизвестных объектах (табл. 1). Наиболее эффективным по проценту корректно определенных объектов оказалось правило, полученное третьим способом.

Таблица 1.

Результаты тестирования решающих правил

Тип объекта	Всего	Кол-во неправильно определенных объектов	Процент правильно определенных объектов
Дерево решений (CART)			
Импульсы	3899	11	99,72%
Шум	1124	0	100%
Граница			
Импульсы	3899	8	99,78%
Шум	1124	0	100%
Центры классов			
Импульсы	3899	6	99,85%
Шум	1124	0	100%

Для проверки робастности алгоритма обнаружения импульсов на основе метода согласованного преследования был проведен следующий эксперимент. Было отобрано 200 слабо зашумленных импульсов, не включенных в обучающую выборку, к каждому из них последовательно, до тех пор, пока алгоритм не давал ложный результат, прибавлялся белый шум все большей амплитуды. Эксперимент показал, что алгоритм дает ложный результат в среднем при соотношении сигнал-шум, равном 3.4 дБ. На рис. 7 представлен график зависимости процента правильного распознавания от соотношения сигнал-шум (SNR).

Для построения графика на рис. 7 была использована выборка сигнала длиной 10000 отсчетов. На вход алгоритма посылались участки, вырезанные скользящим окном длительностью 8 мс. Для участков, содержащих импульс, частотно-временное разложение сохранялось. В результате были выявлены все импульсы, присутствующие в сигнале, за исключением сильно зашумленных и искаженных (рис. 8).

Заключение

В работе представлены результаты применения разреженной аппроксимации к анализу геоакустических сигналов. Показано, что применение импульсов Берлаге в качестве базисного словаря является более эффек-

тивным, по сравнению со словарем Габоора. Тем не менее, следует отметить, что геоакустические сигналы в большинстве случаев являются многокомпонентными и не все могут быть описаны суперпозицией импульсов Берлаге.

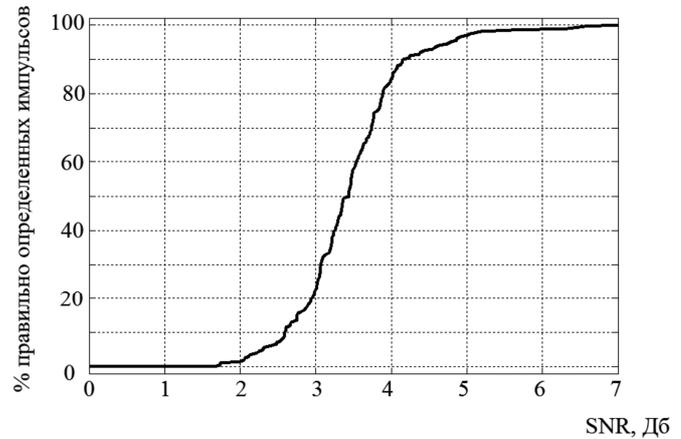


Рис. 7. График зависимости процента правильного распознавания от SNR

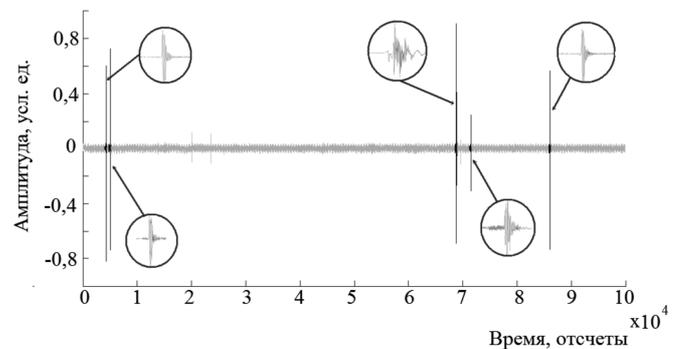


Рис. 8. Пример записи сигнала с выделенными алгоритмом импульсами

Предложенный алгоритм выявления импульсов в сигнале показал, что использование интеллектуальных методов позволяет повысить когнитивную составляющую анализа и позволяет использовать методы разреженной аппроксимации в прикладном аспекте в программных комплексах предобработки регистрируемой информации.

Литература

1. Купцов А.В., Ларионов И.А., Шевцов Б.М. Особенности геоакустической эмиссии при подготовке камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2005, №5, С.45-59.
2. Марапулец Ю.В. Шевцов Б.М. Мезомасштабная акустическая эмиссия. – Владивосток: Даль-наука, 2012
3. Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Купцов А.В., Марапулец Ю.В., Шевцов Б.М., Рутенко А.Н. Геоакустическая локация областей подготовки землетрясений // Доклады АН. 2006, Т.407, №5. С.669-672.
4. Долгих Г.И., Купцов А.В., Ларионов И.А., Марапулец Ю.В., Швец В.А., Шевцов Б.М., Широков О.Н., Чупин В.А., Яковенко С.В. Деформационные и акустические предвестники землетрясений// Доклады АН, 2007, Т.413, №1, С.96-100.

5. Шевцов Б. М., Марапулец Ю.В., Щербина А.О. О направленности приповерхностной высокочастотной геоакустической эмиссии в периоды деформационных возмущений // Доклады АН. 2010, Т.430, №1, С.119-122.

6. Марапулец Ю.В., Тристанов А.Б. Применение метода разреженной аппроксимации в задачах анализа сигналов геоакустической эмиссии // Цифровая обработка сигналов. 2011. №2. С.13-17.

7. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов: Пер с англ. – М.: Мир, 2005

8. Mallat S., Zhang Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries // IEEE Transactions on Signal Processing, 41(12), P.3397-3415.

9. Марапулец Ю.В., Тристанов А.Б. Разреженная аппроксимация акустических временных рядов с использованием частотно-временного словаря Берлаге// Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. Серия:

Цифровая обработка сигналов и её применение. 2012 г. Выпуск: XIV; Том-1, стр. 91-94.

USING THE SPARSE APPROXIMATION AND CLUSTERING METHODS FOR THE TIME SERIES STRUCTURE DESCRIPTION OF ACOUSTIC EMISSION

Afanaseva A.A., Lukovenkova O.O., Marapulets Yu.V., Tristanov A.B.

The sparse approximation method with novel dictionary has been used for time-frequency analysis of acoustic emission. The proposed dictionary is based on Berlage's functions. The algorithm for the acoustic impulses detection, based on the methods of sparse approximation and clustering is suggested.

Научное направление: Обработка и передача информации в системах телекоммуникаций

Секция 5: Обработка и передача изображений

Обсуждение актуальных проблем обработки и передачи изображений велось по трем основным направлениям: сжатие и кодирование изображений, фильтрация, анализ и моделирование, распознавание образов в обработке изображений.

На секции, в частности, обсуждались следующие актуальные научные проблемы:

- сегментация и распознавание дактилем русского языка по видеопоследовательности;
- обработка текстовых изображений;
- коррекция цифровых текстовых изображений в задачах распознавания;
- динамическое хранение видеопотока на основе видеосжатия MJPEG;



- сжатие изображения на основе блочной декомпозиции и вейвлет-преобразования;
- фильтрация и сжатие полутоновых изображений на основе цепей Маркова;
- анализ качества фильтрации шума на изображениях компьютерной томографии;
- трехмерный стереоанализ и совмещение стереоизображений;
- выделение границ объектов с субпиксельной точностью;
- оценивание пространственной ориентации объектов;
- выделение и отслеживание характерных деталей на рентгеновском изображении;
- определение координат и курса беспилотного летательного аппарата;
- метод гистограмм для детектирования появления объекта на видеоданных;

- субполосные методы обработки видеоизображений;
- системы параллельной обработки многомерных сигналов.

По итогам прошедшей конференции были представлены к награждению Дипломами лауреатов конкурса молодых ученых следующие работы:

1. Обработка текстовых изображений с использованием матрицы смежности. Автор – Хвостиков А.В., студент МГУ им. М.В.Ломоносова.
2. Параллельная реализация алгоритмов вычисления областей для анализа эффекта ложного оконтуривания на изображениях. Автор – Ситдииков И.Т., студент МГУ им. М.В. Ломоносова.
3. Проблема сравнения критериев оценки качества искаженного изображения. Автор – Голованов Р.В., аспирант Московского института электронной техники.