

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра радиофизики и нелинейной динамики

Вейвлет-анализ сигналов, содержащих локализованные помехи

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 422 группы

направления 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
физического факультета

Каширина Алексея Владимировича

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.

О.Н. Павлова

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

В.С. Анищенко

Саратов 2019

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире существует множество типов сигналов, таких как электрические, электромагнитные, акустические и другие. Сигналы могут быть как регулярными, которые заданы аналитической функцией, так и случайными, которые принимают произвольные значения в любой момент времени. В зависимости от функции, описывающей параметры сигнала, выделяют непрерывные (аналоговые) сигналы, описываемые непрерывной функцией, дискретные сигналы, описываемые функцией отсчётов, взятых в определённые моменты времени, дискретные сигналы, квантованные по уровню (цифровые).

Существует также очень много источников шумов, которые мешают принятию исходного сигнала. Некоторые виды шума неустранимы принципиально (например, флуктуации измеряемой величины), и с ними надо бороться только методами усреднения сигнала и сужения полосы. Существуют также и другие виды шума, например, помехи на радиочастоте (их можно удалить или уменьшить, воспользовавшись разными приемами). Существует шум, появляющийся по мере усиления сигнала от усилителей, его роль можно снизить, используя малошумящие усилители. Одним из вариантов помех являются мешающие сигналы или паразитные наводки. Шум, который приходит в виде сигналов от источника питания и заземления, в условиях практики может оказывать большее воздействие на исходный сигнал, нежели внутренний шум. Обычно для очистки исходного сигнала используются подходы, основанные на преобразовании Фурье. Но важно понимать, что такие подходы имеют свои ограничения и недостатки, например, они основываются на бесконечно осциллирующих гармонических функциях, и данные об отдельных особенностях сигнала содержатся во всех коэффициентах преобразования, а в такой ситуации очень сложно грамотно отфильтровать помехи. Необходимо не забывать, что классический аппарат преобразования Фурье, изначально создавался для анализа стационарных случайных процессов, которые не меняются во времени. Непрерывное

вейвлет-преобразование используется для исследования частотно-временной динамики сложных процессов [1–4]. В таких случаях размер частотно-временного окна не постоянен, он изменяется в зависимости от используемого временного масштаба. В силу особенностей вейвлет-преобразования, можно отметить, что такой анализ проводится с помощью перемасштабированной и смещенной функции – «материнского» вейвлета $\psi(t)$. Для анализа сигналов часто используется комплексная базисная функция (например, функция Морле), позволяющая выделять и изучать как мгновенную частоту, так и амплитуду. Но важно помнить, что при таком подходе некоторые коэффициенты повторяют информацию из других, значительно увеличивая время обработки.

В настоящее время для увеличения скорости обработки «онлайн» применяется алгоритм дискретного вейвлет-преобразования (ДВП) [5]. В случае ДВП базисы хоть и не имеют аналитического выражения, но должны быть ортонормированы. Так, например, классическим методом вейвлет-фильтрации сигналов является, хорошо изученный 1D-ДВП, он представляет собой вариант многомасштабного анализа. 1D-ДВП использует 2 типа зеркальных фильтров - ФВЧ и ФНЧ. ФВЧ используется для анализа отклонения от проведенного сглаживания, а ФНЧ, как раз и проводит сглаживание сигнала. Так как 1D-ДВП производит многомасштабный анализ [3], мы можем увидеть, что его особенность заключается в разной по уровню детализации анализа сигнала, «для чего рассматриваются последовательные аппроксимирующие пространства, являющиеся отмасштабированными и инвариантными относительно смещений на целые числа разновидностями одного центрального функционального пространства» [5].

Целью выпускной квалификационной работы является сравнительный анализ методов вейвлет-фильтрации, применяющих дискретное вейвлет-преобразование, на примере зашумленных сигналов скорости кровотока в сети кровеносных сосудов, регистрируемых с помощью метода лазерной спекл-интерферометрии.

Материалы исследования. Исследования проводились на основе цифровой обработки экспериментальных данных биологической природы. Анализ выполнялся с применением непрерывного вейвлет-преобразования [1, 4] с базисной функцией Морле, после использовались вейвлеты семейства Добеши D^n с различной областью задания $D^4 - D^{20}$ [6].

Выпускная квалификационная работа содержит введение, две главы (1.Краткие теоретические сведения; 2 Результаты проведенных исследований), заключение и список использованных источников. Общий объем работы 46 стр.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Краткие теоретические сведения. Вейвлет – обобщенное название семейств математических функций определенной формы, которые локальны во времени и по частоте, и в которых все функции получаются из одной базовой (порождающей) посредством ее сдвигов и растяжений по оси времени. Термин "вейвлет" (wavelet) в переводе с английского означает «короткая волна» [1]. Вейвлет-анализ позволяет проводить измерения как в частотной, так и во временной области, что является оптимальным решением задачи при изучении различных непостоянных и нестационарных процессов. Для анализа во временной области используется высокочастотная версия материнского вейвлета, а для анализа частотной области используется низкочастотная версия материнского вейвлета.

В литературе, посвященной ДВП, предлагают варианты коррекции вейвлет-коэффициентов. Известны 2 основных вида коррекции – «жесткий» и «мягкий» [7]. Жесткое задание пороговой функции позволяет выбрать пороговое значение C и обнулить те коэффициенты, которые не превышает C по модулю. В таком случае большие коэффициенты характеризуют информационный сигнал, а малые – помехи. Но когда дело доходит до практики, становится понятным, что даже среди малых коэффициентов бывают отражены некоторые важные части информационного сигнала.

Главным недостатком такого вида задания пороговой функции считается появление разрывов, что приводит к потере регулярности сигнала на этапе его обработки. Но при этом большие коэффициенты остаются прежними, что позволяет не увеличивать амплитуду зашумленного сигнала в процессе фильтрации и восстановления исходного сигнала.

В случае мягкого варианта задания пороговой функции возможно избежать разрывов, но предусматривается корректировка всех коэффициентов. При таком варианте задания пороговой функции изменяется амплитуда сигнала, но его нерегулярность уменьшается. Тем не менее, во многих задачах, относящихся к передаче информации, последнее обстоятельство не является критичным – аудио-сигнал, прошедший процедуру вейвлет-фильтрации, может быть усилен до необходимого уровня громкости, яркость и контрастность видеосигнала также могут быть настроены в соответствии с необходимыми требованиями. По этой причине повышение качества очистки сигналов от помех является более важным обстоятельством, чем сохранение неизменной амплитуды сигнала.

У метода ДВП есть свои недостатки. К ним относятся: осцилляции вейвлет-коэффициентов в окрестности сингулярности, из-за которых происходит усложнение обработки сигналов, отсутствие инвариантности относительно сдвига, которое приводит к непредсказуемым изменениям паттернов вейвлет-коэффициентов при смещении сингулярностей. Так же, при двумерном варианте рассмотрения реализации ДВП появляется проблема потери селективности по направлению, из-за чего усложняется анализ изображений такого вида. К тому же подходы, основанные на стандартных алгоритмах ДВП, не дают нам информацию о фазовых соотношениях. Это недопустимо в некоторых задачах, например, при решении задач про взаимодействие автоколебательных систем. В связи с обстоятельствами, представленными ранее, был предложен и впоследствии усовершенствован метод дуального комплексного вейвлет-преобразования (*dual-tree complex wavelet transform*, ДКВП). Такой подход основан на идее о

том, чтобы добавить к существующим вейвлетам мнимую часть (сопряженную по Гильберту), что дает нам в итоге аналитические фильтры высоких и низких частот. При таком подходе мы получаем инвариантность относительно сдвига и аналитические вейвлеты, которые построены на базе вещественных вейвлет-функций. Речь ранее шла о действительных и мнимых частях вейвлет-коэффициентов, но хотелось бы уточнить, что метод ДКВП дает нам возможность независимо рассчитывать 2 этих части. Такой подход уже зарекомендовал себя при обработке сигналов, что подтверждается многими проводимыми исследованиями. Т.к. ДКВП представляет собой модернизацию метода ДВП, он сохранил в себе все его полезные свойства, но при этом соответственно добавил и свои. Он позволяет работать с амплитудами и фазами всех коэффициентов, что обеспечивает более расширенный анализ полученных экспериментальных данных. Метод ДКВП требует для обеспечения качества анализа применять специальные системы для построения базисов, например, вейвлеты Добеши и множество других различных функций, которые используются для проведения многомасштабного анализа, невозможно применить для этих целей.

Результаты проведенных исследований. Еще на начальных этапах развития лазерной техники было установлено необычное для того периода времени явление. Если луч лазера попадает на матовую поверхность, такую как обычная бумага, или, например, на шероховатую поверхность какого-нибудь материала, то можно наблюдать большое количество сложным образом перемешанных светлых и темных пятен. Подобную структуру стали называть спеклом. Вначале появление спеклов воспринималось как помехи или шум, и от них пытались избавляться. Однако в середине 1970-х годов стало понятно, что анализ спеклов важен в практических задачах. Лазерные спеклы, формируемые отраженным или прошедшим светом, формируют интерференционное пространство, которое характеризуется различной яркостью. Если сфотографировать эту область в некоторой плоскости, то будет получено изображение с пятном, которое называется спекл-

изображением. Так как это изображение формируется с помощью рассеянного когерентного света, изменение спекл-изображения будет соответствовать изменению свойств объекта. В случае непрозрачных объектов обычно применяют отраженный свет, а в случае прозрачных – рассеянный свет.

Анализ экспериментальных данных. В ходе экспериментов, проведенных совместно сотрудниками кафедры физиологии человека и животных и кафедры оптики и биофотоники, были записаны сигналы скорости кровотока, приведенные на рисунках 1 и 2.

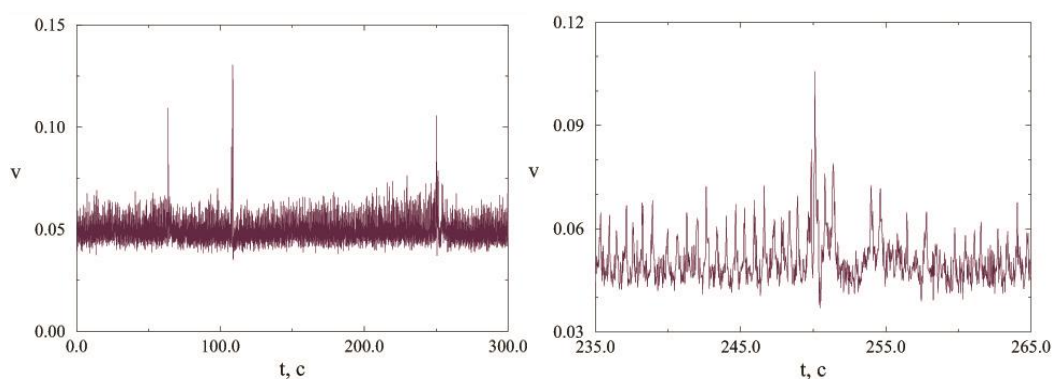


Рисунок 1 – Временная зависимость скорости кровотока (в произвольных единицах измерения) в крупном кровеносном сосуде и ее небольшой фрагмент

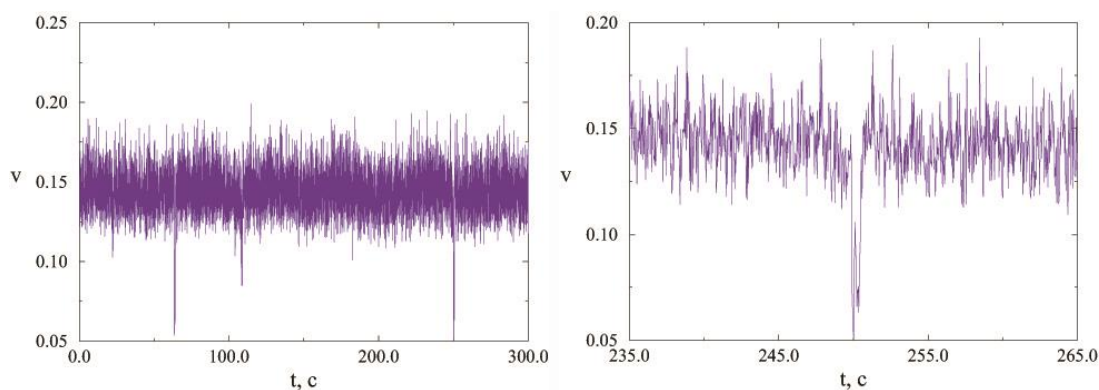


Рисунок 2 – Временная зависимость скорости кровотока (в произвольных единицах измерения) в мелком кровеносном сосуде и ее небольшой фрагмент

На рисунке 1 приведен сигнал, описывающий макроциркуляцию крови. Для наглядности приведен сигнал целиком и его небольшой фрагмент,

позволяющий лучше увидеть наличие сбойных участков. Их причиной, по-видимому, являются не сбои оборудования, а любое движение животного и это движение сопровождается артефактом записи. Довольно часто артефакты просто удаляются из экспериментальных данных, но удаление фрагментов записи будет приводить к разрушению корреляций, что является нежелательным эффектом. Аналогичный сигнал микроциркуляции приведен на рисунке 2.

Таким образом, оценивалось, как проведение коррекции вейвлет-коэффициентов скажется на восстановленном сигнале. В ходе проведенных исследований выбирался мягкий вариант задания пороговой функции при фильтрации, который традиционно считается более предпочтительным при проведении предварительной обработки сигналов и изображений.

На первоначальном этапе был применен метод вейвлет-фильтрации с использованием непрерывного вейвлет-преобразования, применяющего комплексную базисную функцию Морле. Это сравнительно медленный вариант проведения вычислений, который редко используется при обработке больших массивов данных, особенно, если необходимо провести вычисления в режиме реального времени. Однако преимущество использования этого подхода заключается в возможности легко определить частоты среза применяемого вейвлет-фильтра.

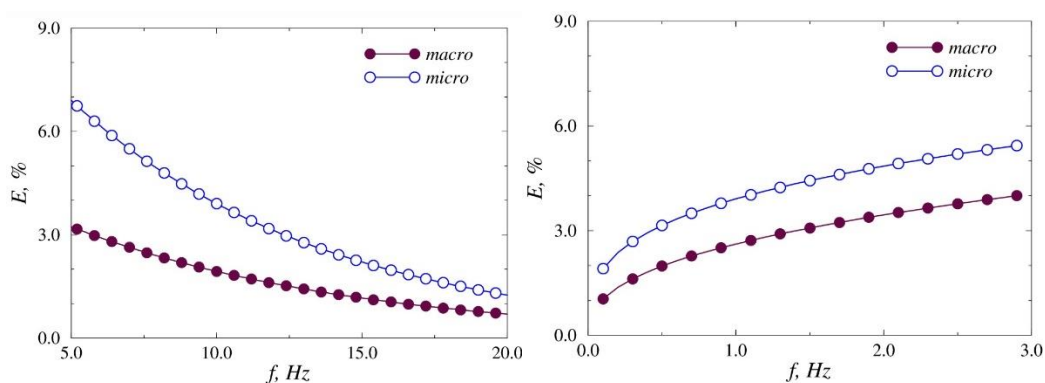


Рисунок 3 – Зависимость среднеквадратичной ошибки фильтрации от выбора частоты среза фильтра нижних частот (а) и верхних частот (б) для вейвлет-фильтрации с базисной функцией Морле

На рисунке 3 показано, как частота среза фильтра влияет на среднеквадратичную ошибку фильтрации. В данном случае рассмотрены варианты выбора фильтра нижних частот и фильтра верхних частот. Расчеты проведены для сигналов, приведенных на рисунках 1 и 2. Как видно из приведенных рисунков, выбор частоты среза фильтра оказывает существенное влияние. Кроме того, исходя из результатов расчетов, мы можем сделать вывод о том, что среднеквадратичная ошибка фильтрации не является достаточным критерием качества фильтрации в рассматриваемой задаче, так как если коррекция вейвлет-коэффициентов не проводится, то ошибка будет минимальна, но это не отражает качество фильтрации. По этой причине расчеты ошибки необходимо дополнять другими критериями, по которым можно судить о том, что фильтрация выполнена успешно.

В данной работе был использован прием подбора параметров фильтра (величина порога при корректировке вейвлет-коэффициентов) и осуществлялся визуальный анализ качества фильтрации – визуально сравнивались сигналы до фильтрации и после. При этом отслеживалось, что фильтрация позволяет устранить сбойные участки на экспериментальной записи – то есть наличие сбоя визуально не фиксируется. После этого менялся вейвлет-базис – были рассмотрены вейвлеты семейства Добеши D^n с различной областью задания $D^4 - D^{20}$, включая случаи асимметричных (“e”) и симметричных (“s”) базисных функций. Для каждого нового базиса вычислялась среднеквадратичная ошибка фильтрации, но не для сбойных участков, а в их окрестности, где мы рассматриваем экспериментальные данные как «чистые», не содержащие артефактов. Таким образом, качество фильтрации оценивалось и визуально, и по количественному критерию – среднеквадратичной ошибке. Это позволяло более надежно судить о качестве фильтрации.

На рисунках 4 и 5 представлены результаты сравнительного анализа для сигналов, приведенных на рисунках 1 и 2 соответственно. На каждом рисунке отдельно приведены результаты расчета для асимметричных и

симметричных базисных функций при выборе вейвлетов $D^8 - D^{20}$. Отметим, что для вейвлетов D^4 и D^6 две разные базисные функции не вводятся, поэтому результаты для этих базисов повторяются.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, как для скорости кровотока в крупных церебральных сосудах, так и для скорости кровотока в мелких церебральных сосудах, улучшение качества фильтрации достигается для асимметричных базисных функций, которые являются более локализованными. Во-вторых, лучше результаты получаются для базисных функций со средней областью задания (они являются средними с точки зрения гладкости вейвлетов).

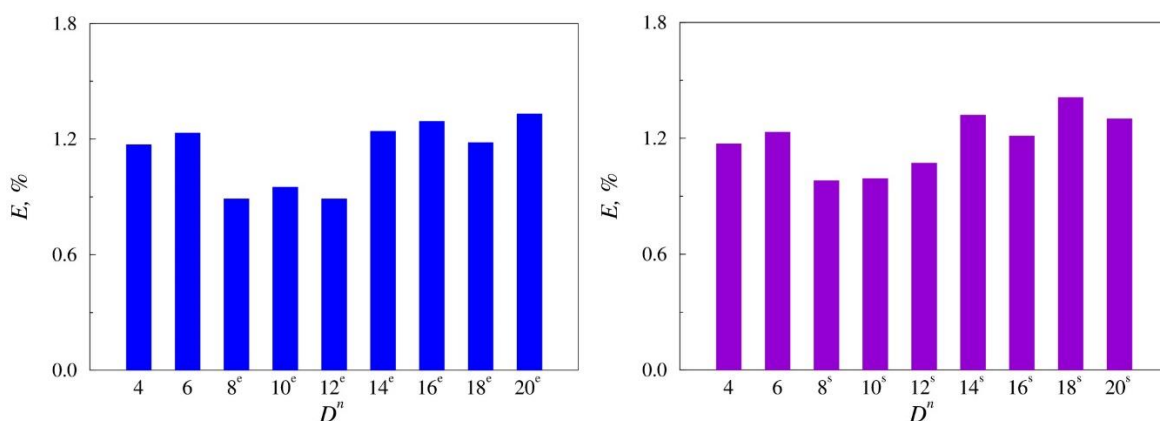


Рисунок 4 – Зависимости среднеквадратичной ошибки фильтрации от выбора вейвлет-базиса (вейвлета семейства Добеши) для случая асимметричных (а) и симметричных (б) базисных функций (анализ данных макроциркуляции)

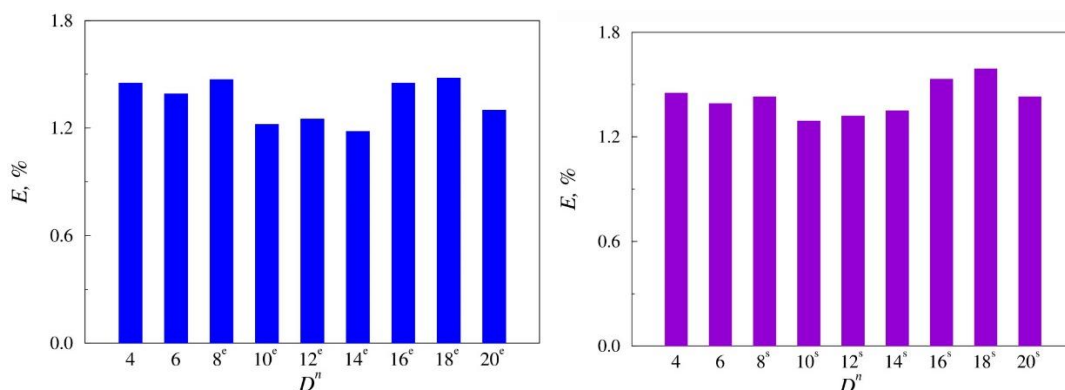


Рисунок 5 – Зависимости среднеквадратичной ошибки фильтрации от выбора вейвлет-базиса (вейвлета семейства Добеши) для случая асимметричных (а) и симметричных (б) базисных функций (анализ данных микроциркуляции)

Вероятно, это обстоятельство связано с тем, что слишком негладкие функции приводят к более выраженным искажениям отфильтрованного сигнала, а, напротив, слишком гладкие функции не позволяют эффективно справиться с фильтрацией локализованных помех. При средней области задания вейвлета наблюдается компромисс.

Эти выводы подтверждаются при статистическом анализе. В таблице 1 приведены данные сравнительного анализа по 20 экспериментальным сигналам скорости кровотока. Они также свидетельствуют о том, что для вейвлетов со средней областью задания качество фильтрации обычно лучше.

Таблица 1 – Число сигналов, для которых выбранная вейвлет-функция обеспечивает минимальную среднеквадратичную ошибку фильтрации. Данные приведены для всех сигналов (макро- и микроциркуляция) и для случая асимметричных вейвлетов семейства Добеши.

Вейвлет-функция	Число сигналов
D^4	0
D^6	2
D^8	4
D^{10}	6
D^{12}	5
D^{14}	2
D^{16}	0
D^{18}	1
D^{20}	0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально регистрируемые данные содержат шум различного происхождения, в том числе локализованные помехи, для фильтрации которых целесообразно применять методы на основе хорошо локализованных функций – вейвлетов. В выпускной квалификационной

работе задача фильтрации решается применительно к сигналам скорости кровотока в сети кровеносных сосудов, регистрируемым с помощью метода лазерной спекл-интерферометрии.

В ходе проведенных исследований оценивалось, как проведение коррекции вейвлет-коэффициентов скажется на восстановленном сигнале. Были сопоставлены вейвлеты семейства Добеши D^n с различной областью задания (D^4 - D^{20}), включая случаи асимметричных и симметричных базисных функций.

Было установлено, что улучшение качества фильтрации чаще достигается при использовании асимметричных базисных функций, которые являются более локализованными. Кроме того, более высокое качество фильтрации было получено для базисных функций со средней областью задания. Это обстоятельство может быть связано с тем, что при средней области задания вейвлета наблюдается компромисс между уменьшением искажений информационного сигнала при его синтезе по вейвлет-коэффициентам и устранением локализованных помех.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Астафьева, Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения / Н. М. Астафьева // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166, №11. – С. 1145–1170.
2. Addison, P. S. Secondary transform decoupling of shifted nonstationary signal modulation components: application to photoplethysmography / P. S. Addison, J. N. Watson // Int. J. Wavelets Multires. Inf. Proc. – 2004. – Vol. 2. – P. 43–57.
3. Jaffard, S. Wavelets: tools for science and technology / S. Jaffard, Y. Meyer, R. Ryan. – Philadelphia: S.I.A.M., 2001.
4. Pavlov, A. N. Application of wavelet-based tools to study the dynamics of biological processes / A. N. Pavlov, V. A. Makarov, E. Mosekilde, O. V. Sosnovtseva // Briefings in Bioinformatics. – 2006. – Vol. 7. – P. 375–389.

5. Дремин И. М. Вейвлеты и их применение / И. М. Дремин, О. В. Иванов, В. А. Нечитайло // Успехи физических наук. – 2001. – Т. 171. – С. 465–501.
6. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши. – Ижевск: РХД, 2001. – 464 с.
7. Оппенгейм, А. Цифровая обработка сигналов / А. Оппенгейм, Р. Шафер. – М.: Техносфера, 2007.