

Научная статья

УДК 004.934

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180683>

## **КАЧЕСТВЕННЫЙ ПОДХОД В РАСКРЫТИИ ИНФОРМАЦИОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ВОЛНОВЫХ ДАННЫХ**

**Николай Евгеньевич Балакирев<sup>1</sup>, Михаил Михайлович Фадеев<sup>2</sup>, Вадим  
Станиславович Родионов<sup>3</sup>✉**

<sup>1,2,3</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Москва, Россия

<sup>1</sup>balakirev1949@yandex.ru

<sup>2</sup>fadeev\_mix@bk.ru

<sup>3</sup>tuukvadim@live.com✉

**Аннотация.** В статье рассматривается возможность использования качественного подхода при раскрытии информационного содержания потоков данных волновых явлений. Вскрытие такого содержания является основой распознавания речи или интегрального, информационного анализа сложных природных явлений на основе рассмотрения волновых сигналов. Предлагается механизм описания волн в виде логико-лингвистических последовательностей на теоретической основе в виде системы отношений, позволяющий рассматривать и описывать поток данных волновых явлений как последовательность структур, выступающих в качестве исходного алфавита знаков.

**Ключевые слова:** информационное содержание, распознавание, качественный подход

*Для цитирования:* Балакирев Н.Е., Фадеев М.М., Родионов В.С. Качественный подход в раскрытии информационного содержания волновых данных // Труды МАИ. 2024. № 136. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180683>

Original article

## QUALITATIVE APPROACH IN EXTRACTING THE INFORMATION CONTENT OF WAVE DATA

**Nikolay E. Balakirev<sup>1</sup>, Mikhail M. Fadeev<sup>2</sup>, Vadim S. Rodionov<sup>3</sup>**✉

<sup>1,2,3</sup>Moscow Aviation Institute (national research University), MAI, Moscow, Russia

<sup>1</sup>balakirev1949@yandex.ru

<sup>2</sup>fadeev\_mix@bk.ru

<sup>3</sup>tuukvadim@live.com ✉

**Abstract.** This article examines the use of a qualitative approach in the analysis of wave phenomena, the features of studying waves as a qualitative aspect, and the introduction of new approaches in the analysis and synthesis of waves. The authors note that most pattern recognition systems based on wave phenomena use classical mathematical methods for modeling and analyzing data, focusing on quantitative characteristics. However, this article raises the question of a qualitative assessment of the data obtained and their content, and also considers the possibility of using a qualitative approach in disclosing the information content of data flows of wave phenomena. The dissection of such content is the basis for

speech recognition or integral, informational analysis of complex natural phenomena based on the consideration of wave signals.

The article proposes a logical-linguistic method that allows you to automatically describe the flow of wave data using a system of relationships and create structured data models and describe the data flow of wave phenomena as a sequence of structures acting as the initial alphabet of signs.

Structures have been developed and used to describe wave flows and create unique algorithms. Practical results include structuring sound streams, compacting information, watermarking, voicemail, and other technological advances. Practical application in the field of aviation and rocket industry takes place in the field of communication and data storage, as well as fixation of measuring instruments, where wave fluctuations are possible for their subsequent analysis.

In conclusion, the article offers a new approach to the analysis and synthesis of wave data based on a qualitative assessment of the data content, which opens up new prospects for the field of wave research and their applications.

**Keywords:** information content, recognition, qualitative approach

**For citation:** Balakirev N.E., Fadeev M.M., Rodionov V.S. Qualitative approach in extracting the information content of wave data. *Trudy MAI*, 2024, no. 136. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=180683>

В настоящее время большинство систем распознавания образов, ориентированных на изучение волновых явлений, при получении и анализе данных используют классические математические методы и оценки, отражающие, в первую

очередь, **количественную сторону**, которая касается изучения, моделирования и воспроизведения, прежде всего, физических характеристик явлений. Такие методы направлены на получение **моделей**, наиболее точно отражающих физический процесс волнового явления, т. е. максимальную функциональную аппроксимацию, в предположении его непрерывности и бесконечности [1-4]. **Качественная оценка** и осмысление содержания получаемых данных, что и является целью всех исследований, а затем использование их результатов при последующем анализе данных, производилась и ранее, но самим исследователем на следующем этапе анализа.

Развитие науки и технические достижения открыли дорогу для моделирования и создания средств автоматизации в том числе интеллектуальной деятельности человека, а также хранению и передачи информации на большие расстояния и автоматического распознавания. Для человека распознавание образов, как и распознавание речи – это, по существу, **качественная сторона** рассмотрения объектов исследования, и она требует специфических подходов в их моделировании и анализе. Кроме этого, стоит заметить, такое рассмотрение довольствуется **дискретностью** существования, как образа, так и прообраза, потому как запечатленный и распознанный объект не встраивается в систему жизнедеятельности, «прописываясь» надолго или навсегда, а существует в виде отдельного образа, «оживая» по мере необходимости. Пошаговая, периодичная деятельность человека, навязываемая периодичностью природных явлений, соответствует дискретности привлечения образов и периодичному включению их в рассудительную деятельность человека. Для передачи информации стали применяться различные стандарты и

протоколы, целью которых стоит увеличить пропускную способность за меньшее время и используемые ресурсы, что достаточно критично в авиакосмической промышленности, где изделия исчисляются миллионами, а счёт в критической ситуации идёт на миллисекунды. Для систем распознавания образов, применяемых в настоящее время как на передовой, так и на объектах конструирования авиа и космической техники, стоит аналогичная задача в кратчайшие сроки выявить и сообщить о том или ином объекте/дефекте и принять решение, опираясь на образы. Поэтому, решая задачи распознавания образов, нельзя не учитывать указанные особенности.

Кроме этого, ни человек, ни любое техническое устройство не способно анализировать и обрабатывать непрерывный поток данных. Так или иначе, мы довольствуемся снятием данных либо через равные промежутки времени, либо по мере необходимости. Именно **дискретность** при фиксации и обработке данных открыла дорогу к автоматизации интеллектуальной деятельности человека.

В условиях дискретности, конечности и периодичности набора значений данных, а также в связи с необходимостью автоматизации описания информационного содержания всего потока таких данных, количественные методы имеют недостаточный набор возможностей.

Если внимательно и глубоко приглядеться к сущности содержания волн, то любой вид исследуемой волны воспроизводит не только физический характер, генерируемый источником сигналов, но и наполняемое в пассивном или активном виде содержание внутри себя, как отражение информации об окружающем мире или как генерация смысловой информации в случае речевой коммуникации,

соответственно. Вскрытие такого содержания является основой анализа любого вида волн, включая распознавание речи. Например, в исследованиях интегрального, информационного анализа сложных природных явлений на основе рассмотрения волновых сигналов присутствует системная классификация отдельных физических форм (конфигураций) и в итоге, на их основе производится распознавание принадлежности наблюдаемого явления к определенному классу.

К числу явлений, которые носят **волновой** характер, т. е. значения физических метрик не выходят за пределы некоторых значений и в условиях непрерывного распространения повторяют некоторые свои значения с некоторой скважностью, можно отнести звуковые, световые, электромагнитные и другие виды волны. В том числе к таким явлениям можно отнести политические, военные и экономические процессы, в которых поток характеристик не обязательно имеет непосредственную физическую природу. В дальнейшем будет рассматриваться следующее определение волны.

Волна — периодически **повторяющееся** изменение некоторой одной или совокупности физических, экономических, социальных и иных характеристик наблюдаемого процесса во временной разверстке, не выходящих за пределы допустимых, осмысленных границ возможных колебаний их значений. Такое изменение может носить как стационарный, так и не стационарный характер поведения.

Физические величины, как наблюдаемые характеристики, фиксируются как **количественные** значения в соответствии с принятыми в стандартах **метриками** [5]. Но, существуют характеристики, которые носят **качественный** характер, и

предназначены для субъективной оценки рассматриваемого (распознаваемого) объекта. Они не обременены количественным значением, но являются следствием совокупности количественных характеристик. Именно в такой трактовке здесь в полный рост реализуется философский закон перехода количества в качество [6].

Без потери общности при обсуждении и демонстрации **качественной** стороны процессов, будут рассмотрены звуковые волны. Первым шагом по пути фиксирования (записи) звуковой волны, что еще не являлось шагом к раскрытию её содержания, было физическое моделирование. **Имитационное** физическое устройство, повторяющее «поведение» волны при записи на физический носитель, по сути является непрерывным фиксатором изменения физических характеристик во временной разверстке. Обратная операция — это считывание с физического носителя и генерация волны, воспроизводящей её исходное «поведение» [7]. Эту операцию также можно отнести к физическому имитационному воспроизведению исходных характеристик генератором волн.

Таким же, первым шагом **количественной** стороны поведения волн была формализация в виде поведения функции, для которой ось абсцисс была фиксатором временного интервала, а ось ординат значением физической характеристики. Модельной **количественной** основой рассмотрения волн, прежде всего, является функция синус или косинус с параметрами времени, фазы, амплитуды и частоты, которые в большинстве случаев, по своей основе, являются характеристиками стационарной волны [8]. Существует и «компромиссная» человеческая характеристика, согласующая физическое значение амплитуды с человеческим восприятием, а именно, степень громкости, которая измеряется в децибелах [9]. Она

выступает как своеобразная **мера качественного** восприятия звука человеком: оглушительно, очень громко, громко, тихо, очень тихо, не воспринимаемо.

Следующим шагом по пути формализации и изменения взглядов на сущность содержательной стороны фиксируемого потока физических характеристик была цифровизация их значений с некоторым временным дискретным шагом. Оказалось, что при определенных условиях такой выход за «пределы» непрерывности не искажает содержания, заключенного в звуковой волне. В настоящее время для **звуковых волн** такие значения амплитуд волн записываются с фиксированной скважностью в соответствии с требованиями теоремы Котельникова [10] и представляют собой достаточный для воспроизведения дискретный поток данных, отражающих отклонение этих значений от нулевого (среднего значения) в допустимых пределах в соответствии выбранной физической метрикой.

Отсюда можно сделать вывод, что с позиции непрерывности имеется **достаточный** по Котельникову [10] набор дискретных данных для воспроизведения непрерывной звуковой информации, в которой сохраняется необходимое содержание, распознаваемое человеком. Возникает тут же вопрос, а не необходимо ли такое количество данных для вскрытия содержания? Как будет показано далее, это напрямую зависит от информационного содержания потока данных.

### **Количество информации и информационное содержание.**

Прежде чем перейти к качественной оценке воспринимаемой звуковой информации, наряду с понятиями энтропия и количество информации введем термин, как понятие, «**информационное содержание**». Следует отметить, что **количество**

**информации и энтропию** определяют при передаче данных без относительно содержания, которое несет этот поток. Данные характеристики не применимы, когда речь идет о распознавании. Далее будет **рассмотрена необходимость** введения термина «*информационное содержание*» и раскрыта особенность его смысла, исходя из задач распознавания.

При анализе любой участок звуковой волны рассматривается как поток значений в соответствии с метриками рассматриваемой характеристики. Но из подобного множества данных лишь в определенной конфигурация значений несет то содержание, которое является «питательной» основой для образования или формирования звукового образа (например, фонемы). Для человеческого распознавания определенное, ограниченное подмножество данных, которое фильтруется распознающим аппаратом, обеспечивает коммуникацию и определяет **информационное содержание**. Надо понимать, что возможности и потенциал формирования **информационного содержания** для возрастающего количества данных существенно больше, если посылать сообщения в алфавите размерностью больше, чем  $N_1$ , а он напрямую не связан с объемом и количеством информации (энтропией). Часто используемое сочетание – «ценность информации» и количество информации в противовес **информационному содержанию** направлено на оценку и, быть может, значимость того количества, которое содержится в потоке данных. Но в данном рассмотрении интересует, какое подмножество из всего объема данных может являться **информационным содержанием и в каком виде** «пищей» для мыслительной деятельности человека. А главное, как выделить это подмножество и

найти в нем необходимое содержание (распознать), при согласовании его с **образом** распознающего?

Таким образом, наряду с количеством поступающих данных существует и еще один аспект – восприятие данных. То **информационное содержание**, которое присутствует в данных, должно соответствовать образу воспринимающего субъекта. Данные оплодотворяются в информационное содержание при совместимости источника и приемника. Отсюда еще один аспект, который может быть заключен в данных, это то, что один и тот же набор данных может нести множество вариантов **информационного содержания** в зависимости от глубины содержания сопрягаемого образа.

Отсюда следует вывод о том, что **информационное содержание** неразрывно связано с образом распознающего прибора (субъекта) и содержит в себе тот объем содержания, который адекватен образу. Остается пока открытым вопрос, как и каким образом работает или должна «работать» эта связка?

### **В чем сущность образа и его качественная сторона.**

Не трудно понять, что образ не может содержать непосредственных количественных характеристик, а должен включать **качественные** характеристики, которые должны быть абстрагированы от метрик количественного характера. Следуя откровениям Гротендика [11], математика формализует количество, форму и метрики. Качество ближе всего связано с формой сигнала и необходимо найти инструмент вскрытия её и определить теоретическую основу для его применения. Относительно стратегии рассмотрения потока с качественных позиций в основе метода был избран

логи́ко-лингвистический подход, который рассматривает поток как последовательность знаков, «прочтение» которых позволит вскрыть информационное содержание. В качестве теоретической основы была выбрана теория отношений (больше, меньше и равно) [12]. Но она рассматривает не каждое отношение в отдельности, а их совокупность, как единую, объективно существующую систему, позволяющую обеспечить автоматическое описание любого волнового процесса единым набором исходных паттернов. На основе определяемых априорно характерных точек, используя указанную систему отношений, в качестве паттерна формируется однозначный каркас структуры, не зависящий от количественных значений. Разный однозначно определяемый набор отношений между характерными точками порождает различные структуры, количество которых вполне ограничено [15]. И такой набор составляет основу алфавита, с помощью которого можно описывать любой поток данных, отражающих волновое явление, не зависимо от его информационного содержания и физической сущности. Смысловое прочтение последовательности «слов» интерпретируется исследователем с учетом того содержания материала, который рассматривается. Такая привязка конкретного набора последовательности «слов» и **информационного содержания** может быть оформлена в виде алгоритмов распознавания в зависимости от целей исследования или распознавания. По сути, последовательность структур — это вскрытое **информационное содержание**, а привязанное смысловое содержание к структуре — это образ, транслируемый исследователем. Наличие развитого инструментария [13-14] и открытость в возможности его расширения позволяет произвести такую привязку простыми технологическими операциями. Безусловно за исследователем

остается задача классификации полученных качественных данных с информационным содержанием в виде алгоритмов с назначением смысла содержания для каждого класса.

В качестве исходных паттернов описания потока волновых данных были предложены наборы двух исходных структур:

- Структуры ПРИМИТИВ – для трех характерных точек;
- Структуры УНИПРИМ – для более сложной структуры, имеющей от 6 до 10 характерных точек.

Была произведена оценка количества возможных наборов структур в зависимости от количества выбранных характерных точек [15], что позволило определить оптимальный набор используемых структур для **автоматического** описания потока амплитуд, прежде всего для звука.

Таким образом, была создана теоретическая и практическая база для изучения и автоматического распознавания любых видов волн через классификацию с привязкой смыслового (образа смысла) содержания.

**Практические результаты реализуемые и реализованные при использовании механизмов качественного подхода.**

К сожалению, не все теоретические результаты можно доказать последовательностью логических рассуждений. Неоднозначность трактовки одного и того же материала напрямую связано с неадекватностью образов относительно одного же набора данных и понятий, которые с ними связаны. Третьей судьей в данном случае могут быть только практические результаты, подтверждающие правомочность

предлагаемой стратегии качественного подхода, выбранного логико-лингвистического метода, предложенных структур и множества алгоритмов, оформленных в виде стандартных процедур, не говоря уже о разработанном комплексе инструментов исследования.

Не вдаваясь в подробности, имеет смысл перечислить следующие практические результаты, каждый из которых получен через реализацию множества уникальных алгоритмов, каждый из которых может быть использован и для других исследовательских целей:

1. Реализована структуризация звукового потока как на основе ПРИМИТОВов и УНИПРИМов с получением множества количественных и качественных характеристик с возможностью его восстановления практически в исходное состояние [16].
2. На основе структуризации реализована голосовая почта, обеспечивающая снижение сетевого трафика за счет естественного уплотнения при переходе к структурному представлению и защиту передаваемых данных от вскрытия с учетом уникальности структуры и сложного алгоритма восстановления, имеющего множества модификаций, обеспечивающих каждого пользователя уникальным приложением, не совместимым с другими приложениями [17].
3. Реализовано нанесение водяных знаков, практически не вскрываемых даже при знании общего алгоритма нанесения, в силу использования так называемых потенциальных точек, местоположение которых зависит от записываемой информации и носит случайный характер, в дополнение с возможностью использования любого вида шифрования [18].

4. Реализовано уплотнение звуковой информации в формате WAV от 2,5 до 10 раз. Готовится вариант уплотнения с возможностью уплотнения еще на один порядок.
5. Реализована совокупная фрагментация звукового потока в соответствии со смысловым содержанием на основе множества характеристик, фиксируемых в описателе стационарного фрагмента.
6. Реализована программа записи голосовой информации с избавлением от данных, содержащих так называемое минимальное информационное содержание, связанное с участками «тишины», технического шума или щелчков и т. д.
7. Реализована программа получения спектра длин волн, участвующих в формировании информационного содержания.

## **Выводы**

Использование **качественного** подхода при рассмотрении потока волновых данных открыло новое нетривиальное направление исследований, связанное с анализом и синтезом волн на ряду с количественным подходом.

Был предложен и реализован **логико-лингвистический метод** – реализация качественного подхода, позволяющий в автоматическом режиме описать любой поток волновых данных. Формализована теория отношений, имеющая объективную сущность, исходящую из законов существования мира, легла в основу теоретической базы для обеспечения структурирования волновых данных. Введены исходные структуры ПРИМИТИВ и УНИПРИМ, как исходные модели (паттерны) описания

фиксированного набора характерных точек потока, позволили отойти от количественных значений амплитуд и описать его в «алфавите» таких структур.

На основе теоретических установок удалось выделить информационное содержание звукового потока и реализовать множество реально работающих систем, имеющих практическое значение. Все полученные практические результаты и исследовательский комплекс могут быть использованы во многих направлениях исследования волн.

Их использование имеет перспективу использования, в частности, и в области аэронавигации [19-20], где присутствует частый обмен сообщениями, к примеру, между воздушными судами и диспетчерами, а также имеется необходимость хранения большой объём записей переговоров в бортовых самописцах.

### **Список источников**

1. Черников А.А. Алгоритм обнаружения и классификации объектов на неоднородном фоне для оптико-электронных систем // Труды МАИ. 2023. № 129. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=173039>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-26](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-26)
2. Попов Е.П., Вережкин А.А., Насонов Ф.А. Исследование физических особенностей авиационных систем с применением математического моделирования на примере системы воздушного охлаждения // Труды МАИ. 2021. № 120. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=161429>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-15](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-15)
3. Лебедев А.С., Добролюбов А.Н., Михайленко А.В., Безруков А.В. Поиск диагностических признаков для системы распознавания загрязнений контролируемых

- поверхностей изделий при оптико-электронном контроле // Труды МАИ. 2020. № 112.  
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=116578>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-018](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-018)
4. Сельвесюк Н.И., Веселов Ю.Г., Гайденов А.В., Островский А.С. Оценка характеристик обнаружения и распознавания объектов на изображении от специальных оптико-электронных систем наблюдения летного поля // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=100782>
  5. Митрохин А.Н. К вопросу об адекватности некоторых понятий, определений и терминов метрологии или слово в защиту единицы измерения // Законодательная и прикладная метрология. 2002. № 5. С. 37-45.
  6. Философская энциклопедия. Том 2. – М.: Советская энциклопедия, 1962. - 575 с.
  7. Дж. Х. Уизем. Линейные и нелинейные волны / перевод с англ. В.В. Жаринова; под ред. А.Б. Шаббата. М.: Мир, 1977. 622 с.
  8. Фадеев М.М., Балакирев Н.Е., Родионов В.С., Сергеев И.С., Умрюхин Е.А. Количественная и качественная фрагментация потока данных // Материалы XXIV Международной конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии». (Воронеж, 14-15 февраля 2024). – Воронеж: Изд. дом ВГУ, 2024. С. 807-813.
  9. Гинкин Г.Г. Логарифмы, децибелы, децилоги. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. - 352 с.
  10. Котельников В.А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи // Успехи физических наук. 2006. № 7. С. 762-770.
  11. Гротендик А. Урожай и посеvy. Размышления о прошлом математика. - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. - 288 с.

12. Фадеев М.М., Балакирев Н.Е. Система отношений как базовая основа качественного подхода при структуризации волн // Международная научная конференция «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (Воронеж, 4-6 декабря 2023): сборник трудов. – Воронеж: Изд-во Научно-исследовательские публикации, 2024. С. 1464-1469.
13. Балакирев Н.Е., Нгуен Х.З., Малков М.А., Фадеев М.М. Структуризация и качественное рассмотрение звукового потока в системе синтеза и анализа речи // Программные продукты и системы. 2018. Т. 31. № 4. С. 768–776.
14. Фадеев М.М., Балакирев Н.Е. Система обеспечения извлечения информационного содержания волн. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023688814 РФ, 25.12.2023.
15. Балакирев Н.Е., Гуснин С.Ю., Фетисов С.В. Один из способов восстановления волны по значениям экстремальных точек // Материалы XVI Международной научно-методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии». – (Воронеж, 11–12 февраля 2016). – Воронеж: Изд-во Научно-исследовательские публикации, 2016. С. 65-69.
16. Балакирев Н.Е., Евсеева М.В, Нгуен Х.З., Фадеев М.М. Новые подходы в создании инструментария для исследований информационного содержания волн // II Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием им. В.В. Губарева «Интеллектуальный анализ сигналов, данных и знаний: методы и средства» (Новосибирск, 11–13 декабря 2018): сборник статей. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2018. – С. 22-28.

17. Нефедов Н.Е., Балакирев С.Ю., Гуснин К.Д., Жуков М.А. Нестандартный способ скрытой передачи звуковой информации // Материалы XVI Международной научно-методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии» (Воронеж, 11–12 февраля 2016). – Воронеж: Изд-во Научно-исследовательские публикации, 2016. С. 216-220.
18. Фадеев М.М., Белоусов А.Е., Балакирев Н.Е. Система нанесения, извлечения и контроля цифровых водяных знаков для звуковых файлов в рамках качественного подхода. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024613488 РФ, 13.02.2024.
19. Балакирев Н.Е., Нгуен Х.З. Особенности распознавания тональности в речевом потоке // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=102430>
20. Дементьев А.Н., Ключев Д.С., Новиков А.Н., Межнов А.С., Питерскова Ю.А., Захарова Е.В., Дементьев Л.А. Развитие методов пространственно-временной обработки широкополосных сигналов в адаптивной антенной решетке // Труды МАИ. 2022. № 124. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=167170>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-25](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-25)

## References

1. Chernikov A.A. *Trudy MAI*, 2023, no. 129. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=173039>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-26](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-26)
2. Popov E.P., Vereikin A.A., Nasonov F.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 120. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=161429>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-15](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-15)

3. Lebedev A.S., Dobrolyubov A.N., Mikhailenko A.V., Bezrukov A.V. *Trudy MAI*, 2020, no. 112. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=116578>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-018](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-018)
4. Sel'vesyuk N.I., Veselov Yu.G., Gaidenkov A.V., Ostrovskii A.S. *Trudy MAI*, 2018, no. 103. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=100782>
5. Mitrokhin A.N. *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya*, 2002, no. 5, pp. 37-45.
6. *Filosofskaya entsiklopediya. Vol. 2.* (The Philosophical Encyclopedia. Vol 2.), Moscow, Sovetskaya entsiklopediya, 1962, 575 p.
7. Dzh. Kh. Uizem. *Lineinye i nelineinye volny* (Linear and nonlinear waves), Moscow, Mir, 1977, 622 p.
8. Fadeev M.M., Balakirev N.E., Rodionov V.S., Sergeev I.S., Umryukhin E.A. *Materialy XXIV Mezhdunarodnoi konferentsii «Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii»*. Voronezh, Izd. dom VGU, 2024, pp. 807-813.
9. Ginkin G.G. *Logarifmy, detsibely, detsilogi* (Logarithms, decibels, decilogues), Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat, 1962, 352 p.
10. Kotel'nikov V.A. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2006, no. 7, pp. 762-770.
11. Grotendik A. *Urozhai i posevy. Razmyshleniya o proshlom matematika* (Harvests and crops. Reflections on the past of mathematics), Izhevsk, NITs Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika, 2002, 288 p.
12. Fadeev M.M., Balakirev N.E. *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Aktual'nye problemy prikladnoi matematiki, informatiki i mekhaniki»*: sbornik trudov. Voronezh, Izd-vo Nauchno-issledovatel'skie publikatsii, 2024, pp. 1464-1469.

13. Balakirev N.E., Nguen Kh.Z., Malkov M.A., Fadeev M.M. *Programmnye produkty i sistemy*, 2018, vol. 31, no. 4, pp. 768–776.
14. Fadeev M.M., Balakirev N.E. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № 2023688814 RF*, 25.12.2023.
15. Balakirev N.E., Gusnin S.Yu., Fetisov S.V. *Materialy XVI Mezhdunarodnoi nauchno-metodicheskoi konferentsii «Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii»*. Voronezh, Izd-vo Nauchno-issledovatel'skie publikatsii, 2016, pp. 65-69.
16. Balakirev N.E., Evseeva M.V, Nguen Kh.Z., Fadeev M.M. *II Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem im. V.V. Gubareva «Intellektual'nyi analiz signalov, dannykh i znanii: metody i sredstva»*: sbornik statei. Novosibirsk, Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2018, pp. 22-28.
17. Nefedov N.E., Balakirev S.Yu., Gusnin K.D., Zhukov M.A. *Materialy XVI Mezhdunarodnoi nauchno-metodicheskoi konferentsii «Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii»*. Voronezh, Izd-vo Nauchno-issledovatel'skie publikatsii, 2016, pp. 216-220.
18. Fadeev M.M., Belousov A.E., Balakirev N.E. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № 2024613488 RF*, 13.02.2024.
19. Balakirev N.E., Nguen Kh.Z. *Trudy MAI*, 2019, no. 104. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=102430>
20. Dement'ev A.N., Klyuev D.S., Novikov A.N., Mezhnov A.S., Piterskova Yu.A., Zakharova E.V., Dement'ev L.A. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=167170>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-25](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-25)

Статья поступила в редакцию 02.03.2024

Одобрена после рецензирования 13.05.2024

Принята к публикации 27.06.2024

The article was submitted on 02.03.2024; approved after reviewing on 13.05.2024; accepted for publication on 27.06.2024