

Ю. Г. Табаков, аспирант, e-mail: vurik204@rambler.ru,  
Воронежская государственная лесотехническая академия, г. Воронеж

## Модель и алгоритм обработки низкочастотного сигнала для тренажера на основе вейвлет-преобразований

*Рассмотрены основные задачи при обработке низкочастотных сигналов, снятых с коры головного мозга, и возможные способы их решения. Предложены математическая модель и алгоритм, построенные на модифицированных вейвлет-преобразованиях Добеши и Морле, позволяющие обрабатывать низкочастотные сигналы в реальном времени и анализировать полученные данные. Представлены структурная схема помодульной обработки сигнала и блок-схема алгоритма. Результаты исследований могут быть применены в специализированных медицинских учреждениях по восстановлению опорно-двигательной системы человека.*

**Ключевые слова:** анализ сигналов, обработка сигналов, низкочастотные сигналы, программирование, интеллектуальный тренажер, вейвлет Добеши, вейвлет Морле, вейвлет-преобразование, математическая модель

### Введение

С каждым годом информационные технологии развиваются с огромной скоростью, а вместе с ними появляются различные проблемы создания, хранения, управления и обработки данных. Так, в последнее время стали использовать методы управления различными высокотехническими устройствами с помощью низкочастотных сигналов, снятых с поверхности коры головного мозга человека с помощью датчиков электроэнцефалограммы (ЭЭГ). Эти методы находят все более широкое применение в видеоиграх, управлении инвалидными колясками, радиоуправляемыми самолетами и т. п.

При обработке низкочастотных сигналов в целях формирования управляющих сигналов возникает ряд проблем, которые часто усложняют анализ полученных данных. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- определение амплитудных и частотных характеристик низкочастотных сигналов;
- помодульное выполнение процесса обработки для получения информационного сигнала;
- анализ полученных данных в целях выявления управляющих сигналов;
- проведение мониторинга данных в реальном времени.

При решении перечисленных задач следует учитывать высокоамплитудные остроконечные формы сигналов. Эти волны сигналов хаотичны и не постоянны, что может привести к различным всплескам на фоне общей активности коры головного мозга человека [1]. В связи с этим было разработано специальное математическое и программное обеспечение на основе вейвлет-преобразований Добеши и Морле, позволяющее обрабатывать данные в реальном времени.

Таким образом, решив поставленные задачи, можно приступить к созданию интеллектуального тренажера на основе низкочастотных сигналов с обучающейся информационной базой. Эти тренажеры предназначены для полного или частичного восстановления опорно-двигательной системы человека через стимуляцию мышц, т. е. тренажеры подают электрические разряды с определенной частотой и силой, что приводит к сокращению и расслаблению мышц конечностей рук или ног [2].

Например, существуют такие тренажеры, как миостимуляторы: компактный прибор для миостимуляции Butterfly XFT1002, стимулятор мышц M18, тренажер для живота электронный Abtronic X2, поястренажер для пресса жимфлекс, устройство для миостимуляции мышц Sport-Elec Multi-Sport, миостимулятор Спорт-Элек SP-2 и т. п., не обладающие специальным программным обеспечением и обучающей информационной системой.

Подобные тренажеры не позволяют полностью автоматизировать процесс восстановительного лечения опорно-двигательной системы человека с помощью низкочастотных сигналов. Автоматизированный процесс, управляемый низкочастотными сигналами, позволяет проводить специализированные тренировки, которые не только подготавливают мышцы к работе, но и восстанавливают фантомные связи между корой головного мозга и конечностями рук или ног [3].

Цель статьи заключается в разработке математической модели и алгоритма в виде подключаемых модулей для программного обеспечения, которые позволят решить поставленные задачи при анализе и обработке низкочастотных сигналов, снятых с поверхности коры головного мозга, а также определить статистические зависимости этих отклонений от естественного нормального распространения сигналов.

## Способ снятия и обработки низкочастотных сигналов

При снятии низкочастотных сигналов с поверхности коры головного мозга человека на первых этапах обработки необходимо применять различные критерии в разработанных моделях [4], благодаря чему можно достичь желаемых результатов. На рис. 1 отображена структурная схема снятия и обработки низкочастотных сигналов.

Для достижения максимального результата низкочастотный сигнал обрабатывается в режиме реального времени с помощью разработанного специального математического и программного обеспечения САЗСМЧ, которое построено на основе вейвлет-преобразования Добеши и Морле [5]. Загрузочный логотип программы представлен на рис. 2.

Функции сигналов по времени и частоте связаны друг с другом вейвлет-преобразованием. За основу функций вейвлет-преобразования в обработке низкочастотных сигналов будут использоваться разработанные модифицированные алгоритмы Добеши [6, 7] и Морле [8]. Зависимости амплитуд низкочастотных (НЧ) сигналов представлены на рис. 3 и рис. 4 соответственно для каждого метода.

### Алгоритм обработки НЧ сигналов на основе методов вейвлет-преобразований

При решении поставленных задач следует учитывать некоторые правила, которые должна включать в себя математическая модель:

- среднее значение функции на всем промежутке должно быть равно 0;
- функция быстро убывает при  $t = \infty$ .

Исходя из этих правил, можно описать основную функцию вейвлет-преобразования, которая имеет следующий вид (1) [9]:

$$W(a, b) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt, \quad (1)$$

где  $W(a, b)$  — вейвлет-коэффициенты;  $\psi$  — вейвлет;  $a$  — момент времени;  $b$  — параметр, обратный частоте;  $f(t)$  — анализируемые данные низкочастотного сигнала, зависящие от времени  $t$ .

В процессе снятия НЧ сигнала могут возникать различные ошибки, что негативно влияет на обработку. Поэтому на первоначальном этапе необходимо учитывать каждый временной отрезок сигнала (рис. 5). Подобный метод приводит к снижению погрешностей и улучшает обработку низкочастотного сигнала [10].

Следует учитывать основные критерии функций вейвлет-преобразования, называемые "функциональные координаты". Эти базисы позволят смещать целевую функцию (1) на заданный временной диапазон в реальном времени [11].



Рис. 1. Структурная схема снятия и обработки сигналов

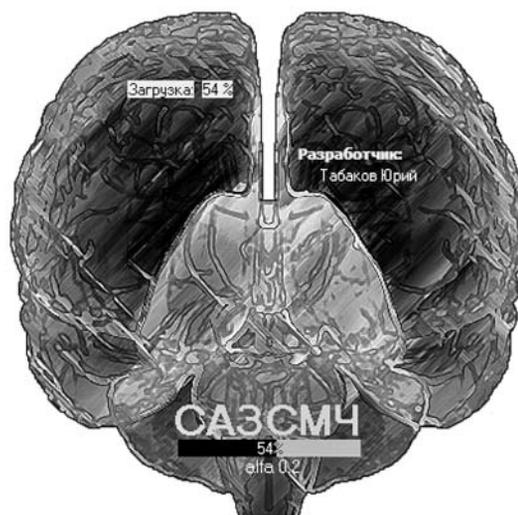


Рис. 2. Загрузочный логотип программы САЗСМЧ

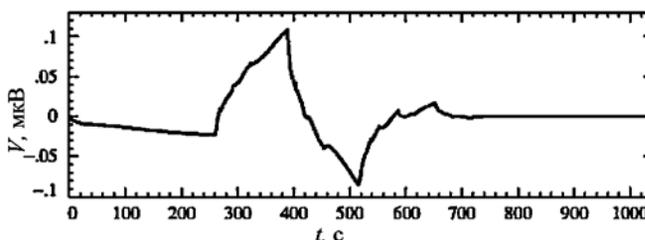


Рис. 3. Временная зависимость амплитуды НЧ сигнала на основе метода вейвлета Добеши

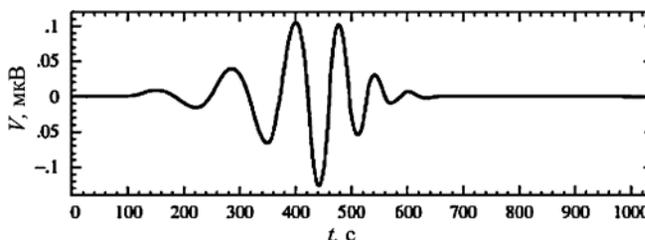


Рис. 4. Временная зависимость амплитуды НЧ сигнала на основе метода вейвлета Морле

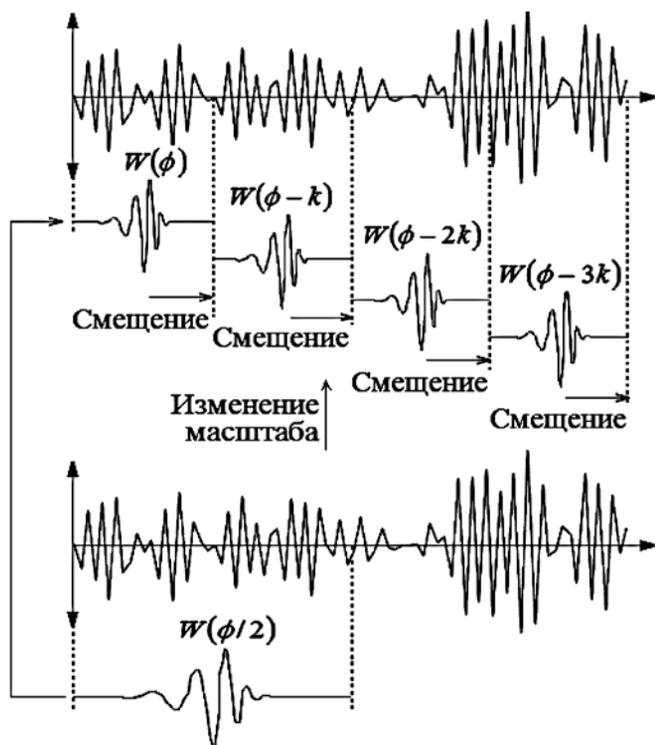


Рис. 5. Временные отрезки сигнала для его помодульной обработки

Разрабатываемый алгоритм основан на модифицированных функциях вейвлет-преобразований Добеши [6, 7] и Морле [8], предназначенных для обработки НЧ сигналов амплитудой от 5 до 15 мкВ и частотой в диапазоне 10...50 Гц. Таким образом, математическая модель получается гибкой и функциональной:

$$\varphi(x) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{2M-1} h_k \varphi(2x - k), \quad (2)$$

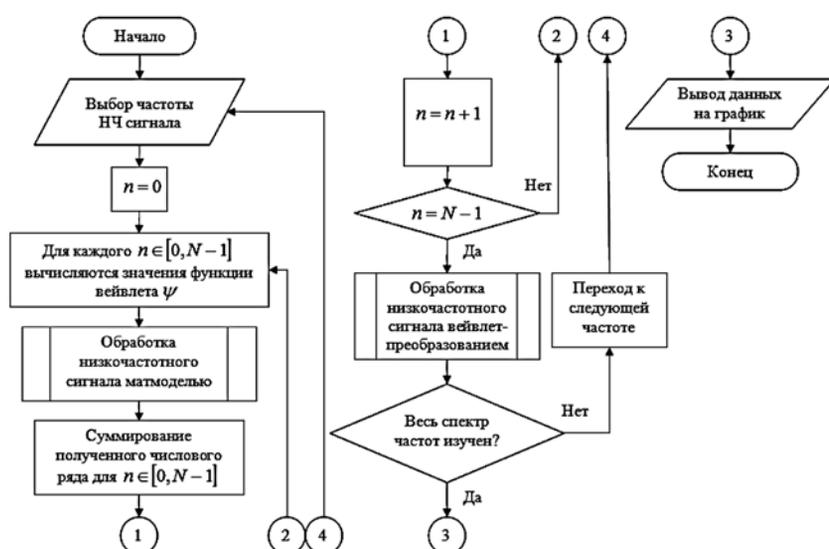


Рис. 6. Алгоритм обработки низкочастотного сигнала

где  $M$  — определяет число коэффициентов вейвлета;  $k$  — целочисленные трансляции;  $h_k = \sqrt{2} \int \varphi(x) \overline{\varphi(2x - k)} dx$  — длина области вейвлета;  $\varphi$  — растяжение/сжатие вейвлета.

Функция вейвлет-преобразования Добеши имеет вид

$$\psi(x) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{2M-1} h_k \varphi(2x - k).$$

Функция вейвлет-преобразования Морле имеет вид

$$\psi(x) = \exp\left(ik_b r - \frac{k^2}{2}\right),$$

где  $r$  — среднеквадратическое отклонение;  $i$  — начальное отклонение;  $b = 2M - 1$  — максимальный коэффициент.

Многомасштабный вейвлет-анализ основан на разложении сигналов на всем промежутке обработки с заданным масштабом  $j_n$ :

$$f(x) = \sum_{k=0}^{2M-1} s_{j_n, k} \phi_{j_n, k} + \sum_{j=j_n}^{j_{\max}} \sum_{k=0}^{2M-1} d_{j, k} \psi_{j, k}$$

где  $\psi_{j, k}$  — смещенные версии масштабного "материнского" вейвлета  $\psi$ ;  $\phi_{j_n, k}$  — масштабированные функции  $\phi$ ;  $s_{j_n, k}$  — коэффициенты аппроксимации;  $d_{j, k}$  — детализирующие коэффициенты.

В математическую модель (2) был внедрен "отцовский вейвлет", позволяющий повысить обработку низкочастотного сигнала:

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{2M-1} h_k \phi(2t - k).$$

НЧ сигнал, снятый с поверхности коры головного мозга, необходимо преобразовывать для хранения и дальнейшей обработки в целях формирования управляющих сигналов. Функции преобразования [12] сигнала записываются следующим образом:

- 8-битное преобразование:

$$(\text{long})(\text{unsigned char})pHdr \rightarrow \rightarrow lpData[n] - 128;$$

- 16-битное преобразование:

$$(\text{long})(\text{signed short})pHdr \rightarrow \rightarrow lpData[n].$$

Алгоритм обработки низкочастотного сигнала представлен на рис. 6.

## Заключение

По итогам работ, рассмотренных в данной статье, был разработан алгоритм с использованием вейвлет-преобразований, которые позволили решить поставленные задачи по формированию информационных сигналов, предназначенных для управления интеллектуальными тренажерами.

С помощью разработанной методики были обработаны и проанализированы низкочастотные сигналы коры головного мозга с датчиков электроэнцефалограммы. По итогам вычислительных экспериментов были выявлены и сопоставлены альфа- ( $\alpha$ -), бета- ( $\beta$ -), гамма- ( $\gamma$ -) и мю- ( $\mu$ -) сигналы, а также определена основа для реализации метода обработки управляющих сигналов коры головного мозга с датчиков электроэнцефалограммы [13, 14], связанная со снижением или уменьшением бета- ( $\beta$ -) сигналов с параметрами амплитуды менее 5...15 мкВ с частотой диапазона 10...50 Гц.

## Список литературы

1. Лавлинский В. В., Иванова О. Г. Формирование моделей и методов взаимодействия информационных процессов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. № 5. С. 39—50.
2. Бибииков Д. В., Буров Р. Б., Лавлинский В. В., Табаков Ю. Г. Исследование подходов для создания информационной составляющей при проектировании интеллектуального тренажера на основе сигналов коры головного мозга // Моделирование систем и процессов. 2012. № 4. С. 52—56.
3. Бибииков Д. В., Буров Р. Б., Лавлинский В. В., Табаков Ю. Г. Метод проектирования схем для считывания НЧ-сигналов с коры головного мозга // Моделирование систем и процессов. 2013. № 2. С. 11—14.
4. Табаков Ю. Г., Лавлинский В. В. Рационализация выбора математических алгоритмов для управляющих НЧ сигналов // Моделирование систем и процессов. 2014. № 3. С. 39—41.
5. Табаков Ю. Г., Лавлинский В. В., Бибииков Д. В. Оптимизация алгоритмов вейвлет-преобразования при моделировании НЧ сигналов // Моделирование систем и процессов. 2014. № 3. С. 47—49.
6. Бибииков Д. В., Буров Р. Б., Лавлинский В. В., Табаков Ю. Г. Вейвлет-преобразование Добеши для низкочастотных сигналов, снятых с коры головного мозга человека // Моделирование систем и процессов. 2013. № 2. С. 8—11.
7. Табаков Ю. Г., Лавлинский В. В., Бибииков Д. В. Метод и алгоритм обработки НЧ сигналов с помощью вейвлета Добеши // Моделирование систем и процессов. 2014. № 3. С. 42—44.
8. Бибииков Д. В., Лавлинский В. В., Табаков Ю. Г. Модифицированный алгоритм вейвлет-преобразования Морле для анализа НЧ сигналов // Моделирование систем и процессов. 2013. № 3. С. 12—14.
9. Лавлинский В. В., Табаков Ю. Г. Анализ вейвлет-преобразований Добеши и Морле на малейшие изменения в НЧ сигнале // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Сер. "Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах". 2014. № 2. С. 56—59.
10. Табаков Ю. Г., Бибииков Д. В. Анализ вейвлет-преобразования Морле для снятия и обработки НЧ сигналов // Системы управления и информационные технологии. 2014. № 3.2(57). С. 272—275.
11. Лавлинский В. В. Теоретические предпосылки решения проблем формирования моделей и методов взаимодействия информационных процессов // Моделирование систем и процессов. 2013. № 2. С. 30—36.
12. Лавлинский В. В. Теоретические основы моделирования компонентов для систем автоматизации проектирования электронной базы на основе синтеза виртуальной реальности // Моделирование систем и процессов. 2013. № 3. С. 16—20.
13. Бибииков Д. В., Лавлинский В. В. Применение автокорреляционных методов анализа сигналов с датчиков электроэнцефалограммы для разработки интеллектуального тренажера по восстановлению опорно-двигательных навыков // Моделирование систем и процессов. 2012. № 2. С. 22—26.
14. Табаков Ю. Г., Лавлинский В. В., Бибииков Д. В. Обработка НЧ сигналов для интеллектуальных тренажеров с применением программных линейных фильтров с дискретным временем // Моделирование систем и процессов. 2014. № 3. С. 45—47.

Yu. G. Tabakov, Graduate Student, e-mail: vurik204@rambler.ru  
Voronezh State Academy of Forestry Engineering, Voronezh

## Problems Processing LF Signals in of Intellectual Information Systems

*The article describes and shows the basic problems in the processing of low-frequency signals removed from the cerebral cortex and possible solutions. Proposed a specially designed mathematical models and algorithms for processing low-frequency signals. These model and algorithms constructed on a specially designed and modified Daubechies and Morlaix wavelet-transform, which allow processing low-frequency signals in real time and analyze the data obtained. Present detailed block diagram of the low-frequency signal processing module, which demonstrates the work of the mathematical model. Present a block diagram of the developed mathematical algorithm demonstrating phased operation of processing from low-frequency signal captured from human cerebral cortex. Obtained in the course research results, as well as the developed mathematical models and algorithms can be used in specialized medical institutions dealing with problems rehabilitation of the musculoskeletal system of the person. The purpose of such research — process and analyze low frequency signals taken from the human cerebral cortex, and the data obtained reveal the control signals for intellectual simulators to restore the musculoskeletal system of the person.*

**Keywords:** signal analysis, signal processing, low-frequency signals, programming, intellectual simulator, Daubechies wavelet, Morlaix wavelet, wavelet transform, mathematical model

## References

1. **Lavlinskiy V. V., Ivanov O. G.** Formirovanie modelej i metodov vzaimodejstviya informacionnyh processov. *Pribory i sistemy. Upravlenir, kontrol', diagnostika*. 2014. N 5. P. 39—50.
2. **Bibikov D. V., Burov R. B., Lavlinskiy V. V., Tabakov Yu. G.** Issledovanie podhodov dlja sozdaniya informacionnoj sostavlajushhej pri proektirovanii intellektual'nogo trenazhera na osnove signalov kory golovnogogo mozga. *Modelirovanie sistem i processov*. 2012. N. 4. P. 52—56.
3. **Bibikov D. V., Burov R. B., Lavlinskiy V. V., Tabakov Yu. G.** Metod proektirovanija shem dlja schityvanija NCh-signalov s kory golovnogogo mozga. *Modelirovanie sistem i processov*. 2013. N. 2. P. 11—14.
4. **Tabakov Yu. G., Lavlinskiy V. V.** Racionalizacija vybora matematicheskikh algoritmov dlja upravliaiushhh NCh signalov. *Modelirovanie sistem i processov*. 2014. N. 3. P. 39—41.
5. **Tabakov Yu. G., Lavlinskiy V. V., Bibikov D. V.** Optimizacija algoritmov vejlvet-preobrazovanija pri modelirovanii NCh signalov. *Modelirovanie sistem i processov*. 2014. N. 3. P. 47—49.
6. **Bibikov D. V., Burov R. B., Lavlinskiy V. V., Tabakov Yu. G.** Vejlvet-preobrazovanie Dobeshi dlja nizkochastotnyh signalov, snjatyh s kory golovnogogo mozga cheloveka. *Modelirovanie sistem i processov*. 2013. N. 2. P. 8—11.
7. **Tabakov Yu. G., Lavlinskiy V. V., Bibikov D. V.** Metod i algoritm obrabotki NCh signalov s pomoshh'ju vejlveta Dobeshi. *Modelirovanie sistem i processov*. 2014. N. 3. P. 42—44.
8. **Bibikov D. V., Lavlinskiy V. V., Tabakov Yu. G.** Modificirovannyj algoritm vejlvet-preobrazovanija Morle dlja analiza NCh signalov. *Modelirovanie sistem i processov*. 2013. N. 3. P. 12—14.
9. **Lavlinskiy V. V., Tabakov Yu. G.** Analiz vejlvet-preobrazovanij Dobeshi i Morle na malejshie izmenenija v NCh signale. *Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Ser. "Informacionnye tehnologii v stroitel'nyh, social'nyh i jeekonomicheskikh sistemah"*. 2014. N. 2. P. 56—59.
10. **Tabakov Yu. C., Bibikov D. V.** Analiz vejlvet-preobrazovanija Morle dlja snjatija i obrabotki NCh signalov. *Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii*. 2014. N. 3.2(57). P. 272—275.
11. **Lavlinskiy V. V.** Teoreticheskie predposylki reshenja problem formirovanija modelej i metodov vzaimodejstviya informacionnyh processov. *Modelirovanie sistem i processov*. 2013. N. 2. P. 30—36.
12. **Lavlinskiy V. V.** Teoreticheskie osnovy modelirovanija komponentov dlja sistem avtomatizacii proektirovanija jelektronnoj bazy na osnove sinteza virtual'noi real'nosti. *Modelirovanie sistem i processov*. 2013. N. 3. P. 16—20.
13. **Bibikov D. V., Lavlinskiy V. V.** Primenenie avtokorreljacionnyh metodov analiza signalov s datchikov jelektrojencefalogrammy dlja razrabotki intellektual'nogo trenazhera po vosstanovlenju oporno-dvigatel'nyh navykov. *Modelirovanie sistem i processov*. 2012. N. 2. P. 22—26.
14. **Tabakov Yu. G., Lavlinskiy V. V., Bibikov D. V.** Obrabotka NCh signalov dlja intellektual'nyh trenazherov s primeneniem programnyh linejnyh fil'trov s diskretnym vremenem. *Modelirovanie sistem i processov*. 2014. N. 3. P. 45—47.

ИНФОРМАЦИЯ

Институт Математики им. С. Л. Соболева СО РАН  
Российский Фонд Фундаментальных Исследований  
Российская Ассоциация Распознавания Образов и Анализа Изображений

V Всероссийская конференция  
"ЗНАНИЯ — ОНТОЛОГИИ — ТЕОРИИ"

с международным участием

6—8 октября 2015 г.  
Новосибирск

Конференция посвящена математическим методам представления данных, извлечения знаний и построения теорий предметных областей, анализу формальных понятий, а также методам извлечения информации из текстов естественного языка. Лучшие по итогам конференции доклады будут опубликованы в журналах «Информационные технологии» и «Программная инженерия» (из списка ВАК).

Тематика Конференции отражает основные стадии процесса познания:

- **Обнаружение закономерностей и извлечение знаний**, скрытых в структурированных и неструктурированных данных. Машинное обучение. Распознавание образов. Прогнозирование. Индуктивный вывод.
- **Систематизация знаний**. Инженерия знаний. Управление знаниями. Разработка онтологий предметных областей: технологии создания и применения онтологий.
- **Построение теорий предметных областей**. Анализ формальных понятий. Логическая семантика естественного языка. Нечеткие логики.

Работа конференции планируется в виде пленарных, секционных и стендовых докладов и круглых столов по тематике конференции. Рабочие языки конференции — русский и английский.

**Контактные данные для переписки:**

zont@math.nsc.ru

**Сайт конференции:**

<http://math.nsc.ru/conference/zont/15>