

*На правах рукописи*



КОЗИОНОВ АЛЕКСЕЙ ПЕТРОВИЧ

**КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВЫХ ДАМБ НА ОСНОВЕ  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ**

Специальность 05.11.13 — Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург — 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

**Научный руководитель:** **Иванов Юрий Павлович**, кандидат технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** **Горохов Владимир Леонидович**, доктор технических наук, профессор кафедры техносферной безопасности Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

**Тулупьев Александр Львович**, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией теоретических и междисциплинарных проблем информатики Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук»

**Ведущая организация:** Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева»

Защита состоится «08» декабря 2016 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.233.01 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», а также на сайте университета <http://dissov.guap.ru>

Автореферат разослан «01» ноября 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.233.01

доктор технических наук, профессор

Шелест Д. К.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время более чем две трети европейских городов постоянно находятся под риском затопления. В России под угрозой затопления пребывают более 500 городов. Число зарегистрированных наводнений в Европе увеличилось в четыре раза по сравнению с восьмидесятыми годами XX века. Изменение климата и быстрая урбанизация еще сильнее усугубляют проблему. Большое количество наводнений вызвано прорывом систем защиты от наводнений — грунтовых дамб. Например, в Нидерландах, где 70% территории страны находится ниже уровня моря, с 1134 по 2006 г. было зарегистрировано примерно 1735 случаев разрушения дамб.

Наиболее распространённые защитные гидротехнические сооружения — дамбы (плотины) из грунтовых материалов (насыпные, намывные дамбы и т.д.). Обычно контроль состояния дамб осуществляется инспекторами, которые занимаются обходом тысяч километров дамб. В зависимости от типа дамбы каждый участок проверяется от нескольких раз в год до одного раза в несколько лет. Современные технологии позволяют проводить непрерывный мониторинг и контроль состояния дамб с использованием сетей датчиков, установленных в дамбах. В Европе существует несколько проектов, направленных на исследование и разработку систем защиты от наводнений: FLOODsite, FloodControl, UrbanFlood, IJkDijk и др. Одним из важнейших элементов подобных систем является система контроля состояния дамб.

Оперативный контроль состояния дамбы осуществляется системой контроля состояния дамб путем обработки контрольной информации, собранной с сети датчиков, установленных в дамбу, таких как датчики порового давления (давления воды в порах почвы), уровня воды, акселерометры и/или инклинометры. Ограниченное число устанавливаемых типов датчиков связано с экономической нецелесообразностью установки сложных систем контроля с большим числом контролируемых параметров, как, например, на гидроэлектростанциях.

Зачастую применяемые алгоритмы контроля лишь сравнивают текущее значение контролируемого параметра с допусками и выдают оператору сигнал в случае критических отклонений. Нередко такие алгоритмы не позволяют обнаружить критическое или близкое к критическому состояние объекта, которое скрыто в сложном поведении контролируемого параметра. Оценивание же допусков для контролируемых параметров требует детального исследования объекта мониторинга, наличия большой экспериментальной базы и моделирования большого числа возможных сценариев разрушения дамбы, а этот процесс является высокзатратным и не всегда возможным.

Именно поэтому необходимо использовать интеллектуальные алгоритмы контроля, которые позволяли бы, во-первых, обнаруживать признаки аномального состояния в контролируемых сигналах со сложным поведением в условиях непараметрической априорной неопределённости; во-вторых, оценивать область допустимых значений для контролируемых параметров, используя их исторические записи, соответствующие нормальному состоянию дамбы.

Решением задач, связанных с контролем состояния дамб, плотин и других сооружений и технических объектов, занимались такие зарубежные и российские ученые, как И. Н. Иващенко, А. М. Белостоцкий, И. Ф. Блинов, А. Г. Василевский, А. Г. Добрынин и др.; задачи контроля состояния на основе методов интеллектуального анализа данных решали зарубежные и российские ученые: Р. Айзерман (R. Isermann), П. М. А. Слот (P. M. A. Slood), В. В. Кржижановская, Л. Г. Евланов и др.

Исследование и разработка предлагаемых в настоящей работе метода и алгоритмов контроля состояния дамб лежат в русле развития и совершенствования теории и практики применения интеллектуального анализа данных для задач контроля состояния объектов в условиях априорной непараметрической неопределённости моделей контролируемых параметров.

### **Цель и задачи исследований.**

Целью диссертационного исследования является разработка метода и алгоритмов для проведения оперативного контроля состояния грунтовых дамб, обеспечивающего эффективный мониторинг изменения состояния дамбы, с использованием датчиков системы контроля состояния дамб, установленных в дамбе. В настоящей работе **объектом** исследования являются грунтовые дамбы, а **предметом** исследования — методы и алгоритмы контроля состояния дамб.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать и обосновать метод контроля состояния грунтовых дамб в условиях априорной непараметрической неопределённости области допустимых значений контролируемых параметров и моделей контролируемых параметров.
2. В рамках предложенного метода разработать алгоритмы для контроля состояния дамб на основе анализа одномерных контролируемых сигналов.
3. В рамках предложенного метода разработать алгоритмы для контроля состояния дамб на основе анализа зависимостей между контролируруемыми сигналами.
4. Провести апробацию методов и алгоритмов на реальных данных системы контроля состояния дамб.

**Методы исследования.** В работе использованы методы математического моделирования, математической статистики (в условиях априорной неопределённости), линейной алгебры, теории цифровой обработки сигналов, теории частотно-временного анализа, теории вейвлетов, теории интеллектуального анализа данных и искусственного интеллекта.

### **Научная новизна работы:**

1. Предложен новый метод контроля состояния дамб на основе применения интеллектуального анализа данных и искусственного интеллекта, позволяющий оценить, область допустимых значений для контролируемых параметров, на основе их исторических записей о нормальном состоянии дамбы (посредством обучения) и информировать оператора или другие системы в случае отклонения состояния дамбы от нормального.
2. Разработан универсальный алгоритм контроля состояния дамб на основе частотно-временного анализа контролируемых одномерных сигналов, позволяющий обнаруживать аномальное состояние как с использованием сигналов датчиков инклинометров и акселерометров, так и сигналов датчиков порового давления в условиях непараметрической неопределенности моделей контролируемых параметров.
3. Разработан новый алгоритм контроля состояния дамб на основе анализа частотно-временной зависимости между контролируруемыми сигналами датчиков порового давления (или порового давления и уровня воды) в условиях непараметрической неопределенности моделей контролируемых параметров. Для этого алгоритма отсутствует проблема устойчивости, характерная для моделей вход-выход.
4. Разработан и впервые применен для контроля состояния дамб, алгоритм контроля состояния дамб на основе анализа модели вход-выход между контролируруемыми сигналами датчиков порового давления (или порового давления и уровня воды).

**Практическая значимость** подтверждена положительным опытом внедрения, а именно:

1. Метод и алгоритмы, разработанные в рамках диссертационного исследования, при прямом участии автора были внедрены компанией ООО «Сименс» (дочерняя компания концерна Siemens AG) в процессе разработки системы для мониторинга и контроля состояния грунтовых дамб (Levee Monitoring). Система устанавливалась на дамбах в Нидерландах.

2. Представленный метод и алгоритмы могут расширить технические возможности существующих систем контроля состояния дамб, а также могут быть применены и в других системах, таких как системы контроля состояния объектов инфраструктуры, медицинские приложения, системы контроля состояния технических объектов (двигателей, насосов) и др.
3. В процессе работы были опубликованы четыре патента в Европейском союзе, одна заявка на патент в стадии перевода на национальную фазу. В России на данный момент эти патенты находятся в стадии заявок.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Метод контроля состояния дамб на основе интеллектуального анализа данных в условиях априорной непараметрической неопределённости области допустимых значений контролируемых параметров и моделей контролируемых параметров.
2. Алгоритм контроля состояния дамб на основе частотно-временного анализа одномерных контролируемых сигналов.
3. Алгоритм контроля состояния дамб на основе анализа частотно-временных зависимостей между контролируемыми сигналами.
4. Алгоритм контроля состояния дамб на основе анализа модели вход-выход между контролируемыми сигналами.
5. Проведена апробация метода и алгоритмов на реальных данных системы контроля состояния дамб проекта UrbanFlood и полномасштабного эксперимента IJkDijk.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры; на XVI и XVII конференциях молодых ученых «Навигация и управление движением»; at Automation & control: proceedings of the International Conference of Young Scientists (Санкт-Петербург, 2013 г.); at International Conference on Computational Science (ICCS, Барселона, 2013 г.); at 2<sup>nd</sup> European Conference on FLOODrisk Management (Роттердам, 2012 г.); в рамках заседаний рабочих групп проектов UrbanFlood и IJkDijk по разработке и тестированию систем мониторинга и контроля состояния дамб; на научных сессиях ГУАП (Санкт-Петербург, 2012, 2013, 2014 гг.).

Результаты диссертационного исследования были апробированы автором на реальных данных системы мониторинга и контроля состояния грунтовых дамб (пилотные проекты), расположенных в Великобритании, Нидерландах и Германии, в рамках исследовательского проекта Европейского союза UrbanFlood (грант Евросоюза FP7 N 248767) по исследованию и разработке системы раннего предупреждения; а также в рамках серии полномасштабных экспериментов IJkDijk, проведенных в Нидерландах, где была показана их эффективность — алгоритмы позволили обнаружить аномальные состояния дамб и спрогнозировать разрушение в ходе эксперимента.

Автор диссертации был удостоен стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики (2012–2015 гг.).

**Публикации.** По основным результатам диссертации были опубликованы 17 печатных работ, из них пять статей — в изданиях из списка, рекомендованного ВАК РФ; две работы — в зарубежных изданиях, входящих в каталог Web of Science, рекомендованный ВАК РФ; шесть — в материалах конференций, а также четыре патента в Европейском союзе, в России патенты находятся в стадии заявок.

**Личный вклад автора.** Основные результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Соискатель непосредственно учувствовал в постановке задачи, разработке методов и алгоритмов их решения, в создании алгоритмического и программного обеспечения. Также лично он был занят в процессе внедрения результатов.

**Структура и объем диссертации** Диссертационная работа изложена на 145 страницах текста и состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка использованных источников (111 наименований). Работа включает 84 рисунка и 7 таблиц.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность темы диссертационного исследования, определен объект и предмет исследования, выполнена постановка цели и задач, освещены вопросы научной новизны и практической значимости полученных результатов.

**В первой главе** приводится обзор используемых на практике, методов и систем мониторинга и контроля состояния дамб и других гидротехнических сооружений; описывается аппаратная часть системы контроля состояния дамб, для которой разрабатываются метод и алгоритмы; приводится краткое описание проектов и тестовых дамб, в рамках которых проводилось диссертационное исследование.

Представленные в работе метод и алгоритмы контроля исследовались и разрабатывались для существующей системы контроля состояния дамбы. Система контроля состояния дамб является аппаратно-программным комплексом, включающим следующие основные элементы: датчики, устройства сбора и передачи (GSM-канал) контрольной информации от датчиков; сервер хранения и обработки информации; интерфейс оператора системы.

Задача системы контроля — своевременное обнаружение аномального состояния дамбы, которое может быть признаком последующего ее разрушения. Под аномальным состоянием подразумевается отклонение от нормального, предварительно определённого, состояния объекта, которое может привести к неисправности или разрушению дамбы.

В системе используются датчики порового давления (давление воды в порах почвы), уровня воды, акселерометры и/или инклинометры. Датчики устанавливаются в каждую кросс-секцию (поперечное сечение) дамбы (рисунок 1), такое деление дамбы позволяет локализовать аномальное состояние и предоставляет избыточность контролируемых параметров. Данный набор датчиков позволяет обнаружить большинство причин разрушения дамбы, вызванных внутренней или внешней эрозией и другими воздействиями, влияющими на структурную устойчивость, таким образом, обеспечивая полноту контроля. Поток информации с датчиков в режиме онлайн обрабатывается на сервере системы, где к нему применяются алгоритмы контроля.

Современные тенденции развития систем контроля сложных объектов показали, что повышение эффективности функционирования связано с применением методов интеллектуального анализа данных для обработки контрольной информации и принятия решений.

Для решения задачи контроля состояния дамбы алгоритмы на основе интеллектуального анализа данных (в условиях непараметрической априорной неопределённости) могут быть применены для предварительной обработки контролируемых сигналов с целью выделения признаков аномального состояния, для оценивания области допустимых значений (для предварительно обработанной контрольной информации) на исторических данных о нормальном состоянии и для принятия решения о текущем состоянии дамбы в режиме онлайн.

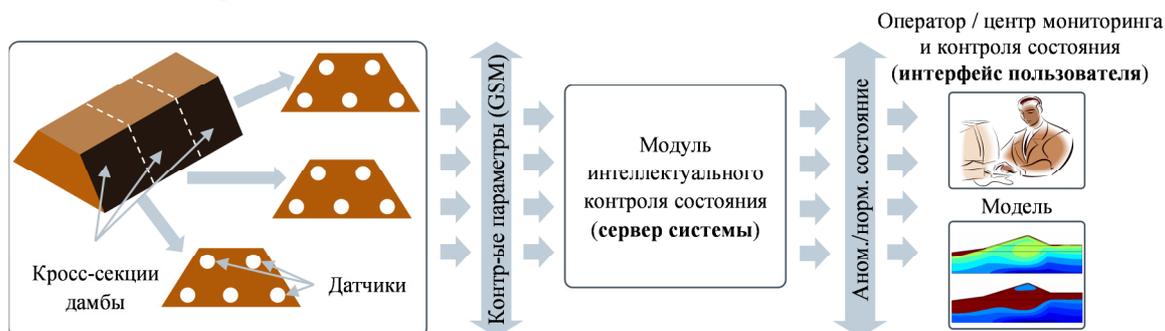


Рисунок 1 — Система контроля состояния дамб

В диссертационном исследовании апробация методов и алгоритмов проводилась на данных дамб, оборудованных системой контроля, в рамках проекта Европейского союза UrbanFlood (грант Евросоюза FP7 N 248767): бостонской дамбы (Бостон, графство Линкольншир, Великобритания), зеландской дамбы Oost Zeedijk (прибрежная дамба, Зеландия, Нидерланды), штаммерской дамбы Stammerdijk (Амстердам, Нидерланды). Также в диссертации использовались материалы серии полноразмерных экспериментов JkDijk, направленных на исследование механизмов разрушения дамб.

**Вторая глава** посвящена предлагаемому методу контроля состояния дамб на основе интеллектуального анализа данных.

Предлагаемый метод контроля состояния дамб состоит из двух режимов: «обучения» и «контроля» (рисунок 2). С момента запуска системы контроля начинается накопление исторической информации о состоянии дамбы. В режиме «обучения» алгоритмы контроля на основе методов интеллектуального анализа данных обучаются на доступных исторических данных о нормальном состоянии дамбы. В режиме «контроля» алгоритмы контроля идентифицируют состояние объекта по текущим сигналам, поступающим в режиме онлайн.

Основные этапы метода (рисунок 2):

Этап 1-й — предварительная обработка контролируемых сигналов. Практика применения систем контроля инфраструктурных объектов, где информация контроля записывается в течение длительного времени (месяцы, годы), показывает, что нередко исторические записи контролируемых сигналов содержат пропуски, вызванные временными отключениями систем передачи или сбора данных, профилактическими и пусконаладочными работами, сбоями или неправильными настройками системы и другими факторами. Решить дополнительную задачу восстановления пропусков необходимо по следующим причинам: во-первых, в дальнейшем будут применяться методы, которые опираются на использование исторической информации о контролируемых параметрах и чувствительные к пропускам (методы частотно-временного анализа); во-вторых, манипулирование данными (особенно многомерными) с пропусками требует разработки дополнительной сложной программной логики, чего следует избегать в процессе разработки программного обеспечения.

На входе этапа — записи контролируемых сигналов с пропусками, а на выходе этапа — сигналы с восстановленными пропусками, где каждый сигнал — это временной ряд  $X = \{X(t), t = T\{0..N\}$ , а в многомерном случае — матрица сигналов  $\mathbf{X}$ , колонки которой сформированы сигналами:  $\mathbf{X} = \{X(t, i), t = T\{0..N\}, i = I\{0..S\}\}$ , где  $N$  — доступное число отсчетов сигналов;  $S$  — количество сигналов.

Этап 2-й — выделение признаков из контролируемых сигналов (англ. — features extraction). Этот этап является наиболее важным. Контролируемые сигналы реальных объектов имеют сложное поведение, отражающееся в их спектральных свойствах, и применение методов идентификации состояния напрямую к исходным сигналам не дает удовлетворительных результатов. Поэтому необходимы методы позволяющие выделять из сигналов признаки, в которых может проявляться аномальное состояние, включая многомерный и одномерный анализы контролируемых сигналов:

$$\mathbf{F} = C(\mathbf{X}), \quad (1)$$

где  $\mathbf{F} = \{(F(t, j)..F(t, j)), t = T\{0..N\}, i = J\{0..K\}\}$  — матрица признаков, полученная преобразованием  $C$  к матрице сигналов  $\mathbf{X}$  (или к вектору сигнала  $X(t)$  в одномерном случае);  $K$  — количество признаков, выделенных из сигналов/сигнала.

Отсутствие моделей контролируемых параметров также накладывает ограничение на применение методов выделения признаков, и, как следствие, необходимо использовать методы, применимые в условиях непараметрической априорной неопределенности.

Временные ряды, соответствующие контролируемым сигналам с датчиков, установленных в дамбах, состоят из часовых, дневных, сезонных и годовых колебаний. Различные виды аномалий проявляются в различных частотах спектра временного ряда: быстрое изменение — высокие частоты, соответствующие мгновенным аномалиям,

характерны для акселерометров и инклинометров; медленное изменение — низкие частоты, соответствующие долговременной стабильности объекта, характерны как для акселерометров и инклинометров, так и для датчиков порового давления. В настоящей диссертации был выбран частотно-временной анализ по следующим причинам:

- наличие возможности обнаружения аномалий в динамических свойствах сигнала посредством обнаружения изменений в частотно-временных свойствах сигнала в условиях непараметрической априорной неопределенности;
- наличие возможности обнаружения сингулярностей (выбросов, разладки и т.д.) в поведении сигнала посредством эффекта Гиббса. Например, в случае воздействия внешней силы на дамбу в сигналах акселерометров или инклинометров появится резкий скачок (разладка);
- разложение нестационарного сложного сигнала на выбранном интервале времени на более простые составляющие с известными полосами частот.

Этап 3-й — идентификация состояния объекта. В режиме контроля метод идентификации состояния оценивает степень принадлежности текущего состояния дамбы к нормальному состоянию дамбы (или аномальному).

Поскольку априорно область допустимых значений для выделенных из контролируемых сигналов признаков неизвестна, но имеются их исторические записи, соответствующие нормальному состоянию дамбы, то необходим метод, который бы обучался (настраивался) на имеющихся исторических данных о нормальном состоянии.

Для решения данной задачи был использован нечеткий классификатор «нейронные облака». Так как для обучения имеются только исторические записи контролируемых параметров о нормальном состоянии — обучающее множество  $X^{об}$ , то классификатор обучается и аппроксимирует область допустимых значений для выделенных из доступного обучающего множества признаков  $F^{об}$ , соответствующих нормальному состоянию дамбы. В иностранной литературе настоящая задача называется одноклассовой классификацией (англ. — one-class classification), когда классификатор обучается только на данных одного класса, в настоящем случае — класса нормального состояния дамбы. Процесс обучения классификатора заключается в нахождении вектора параметров классификатора  $\theta$  на исторических признаках нормального состояния  $F^{об}$ .

В режиме контроля, на этапе идентификации состояния дамбы, выходной сигнал классификатора — это мера близости к аномальному состоянию  $P_c$ :

$$P_c(t) = M(F(t, 1 \dots K), \theta), \quad (2)$$

где  $M$  — метод идентификации состояния (классификатор).

Использование нечеткого классификатора обусловлено тем, что в виду априорной неопределённости точные допуски для контролируемых параметров неизвестны, и можно только оценить степень принадлежности текущего состояния к нормальному состоянию.

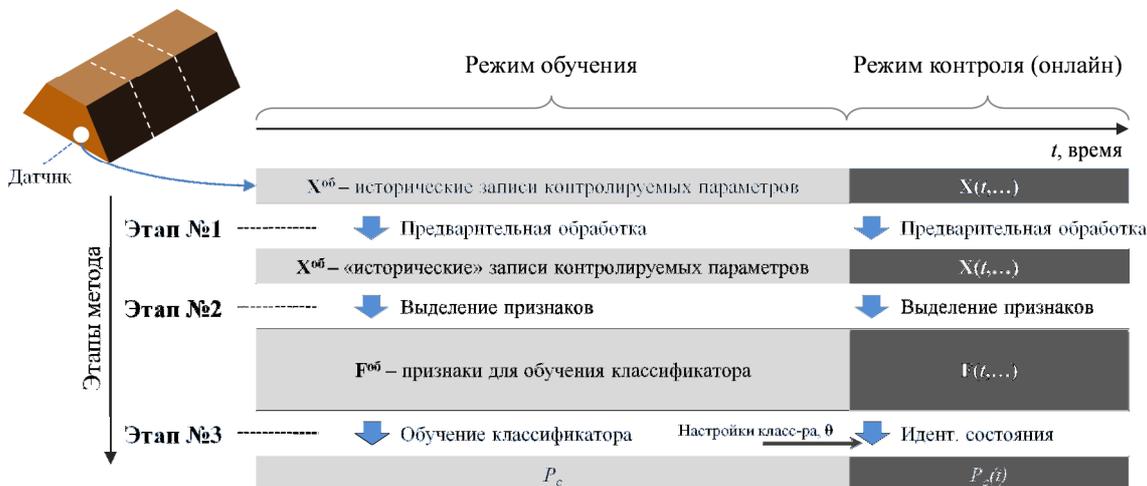


Рисунок 2 — Метод контроля состояния дамб на основе интеллектуального анализа данных

В третьей главе представлены алгоритмы контроля состояния дамб на основе интеллектуального анализа одномерных контролируемых сигналов и алгоритмы для контроля состояния дамб на основе анализа зависимостей между контролируемыми сигналами. Проведен сравнительный анализ алгоритмов на реальных данных с имеющимися реальными примерами аномального состояния. Проведен сравнительный анализ алгоритмов на реальных данных искусственно сгенерированными «типовыми» примерами аномального поведения сигналов, наиболее часто встречающихся в технических системах. Представлены методы и алгоритмы предварительной обработки исторических записей контролируемых параметров.

В рамках предлагаемого метода контроля состояния дамб необходимо иметь исторические записи контролируемых параметров, которые используются методами интеллектуального контроля состояния. Исходные данные системы контроля могут содержать пропуски в исторических записях контролируемых параметров, что накладывает ограничение на применение методов выделения признаков. Необходимо найти оценку  $\hat{X}(t)$  значений стохастического сигнала  $X(t)$  в местах пропусков. Оценка должна соответствовать критерию минимума среднеквадратического отклонения (СКО) ошибки оценки. Предполагается, что сигнал можно описать линейной авторегрессионной моделью. Априорно порядок модели авторегрессии и значения коэффициентов авторегрессии неизвестны. Имеются исторические записи сигналов датчиков (временных рядов).

Для решения этой задачи был предложен алгоритм восстановления пропусков на основе модели авторегрессии. Идея алгоритма восстановления пропусков на основе модели авторегрессии (АР) заключается в прогнозировании значений временного ряда в местах пропусков как «вперед»  $\hat{X}^f(t)$  (прогнозирующая модель) во времени, так и «назад»  $\hat{X}^b(t)$  (интерполирующая модель) с последующим оптимальным усреднением результатов:

$$\hat{X}(t) = \frac{V_t^f \hat{X}^b(t) + V_t^b \hat{X}^f(t)}{V_t^f + V_t^b}, \text{ где } V_t^f \text{ и } V_t^b \text{ — дисперсии ошибки прогноза прямой и обратной}$$

моделей для каждого момента времени и, соответственно, оцениваемые моделью авторегрессии. Обе модели обучаются на доступных исторических данных. Предложенный алгоритм на основе модели авторегрессии (АР) был сопоставлен с алгоритмами восстановления пропусков на основе метода «Гусеница-SSA» (англ. — Singular Spectrum Analysis (SSA), сингулярно-спектральный анализ), преобразования Фурье (ПФ) и линейной интерполяцией (ЛИ).

На рисунке 3 представлены зависимости коэффициента детерминации  $R^2$  и СКО ошибки оценки соответственно для разных величин пропусков от 15 минут (1 отсчет) до двух недель (1344 отсчета). Примерно одинаковую точность показывают алгоритмы восстановления на основе «Гусеница-SSA» и АР-модели. Для величины пропуска до 10 отсчетов (150 минут) все алгоритмы показывают примерно одну точность восстановления, это говорит о том, что для восстановления небольших пропусков (до 10 отсчетов) можно использовать линейную интерполяцию.

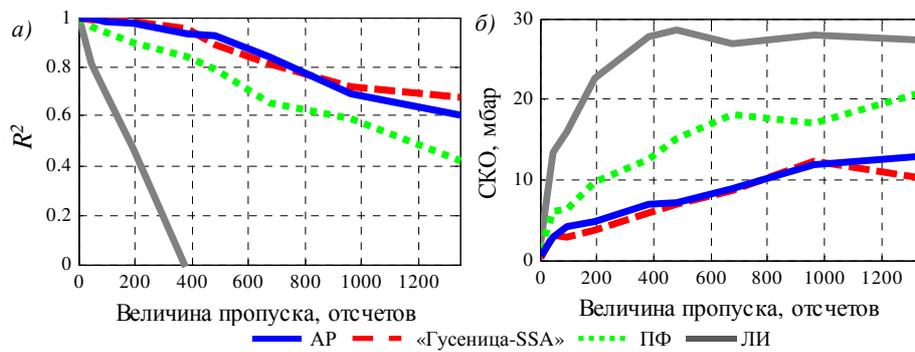


Рисунок 3 — Анализ точности восстановления: *а* — зависимость коэффициента детерминации ( $R^2$ ) от величины пропуска для всех алгоритмов; *б* — зависимость СКО ошибки оценки от величины пропуска для всех алгоритмов

В примере, который приведён далее, рассматриваются квазипериодические сигналы порового давления  $P_{п.}$ , которые содержат детерминированную периодическую составляющую, определяемую приливами и отливами воды (~12 часов). На рисунке 4 представлены примеры восстановления пропусков величиной 384 отсчета (5 дней, 15 минут дискретизация) для трех сигналов порового давления бостонской дамбы. Как видно, алгоритмы восстановления на основе «Гусеница-SSA», AP-модели и преобразования Фурье сохраняют динамику сигнала и показывают примерно одинаковый результат.

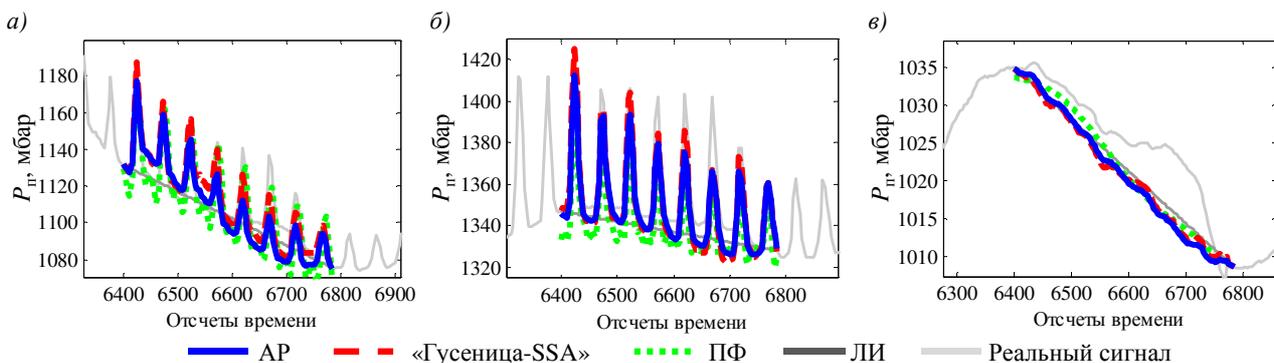


Рисунок 4 — Примеры восстановления пропусков участков трех сигналов, дискретизация 15 минут: *а*, *б*, *в*.

Важным фактором в выборе конкретного алгоритма восстановления пропусков является время восстановления пропуска, которое зависит от вычислительной сложности алгоритма: «Гусеница-SSA» —  $O(K \cdot L^2)$ , где  $L$  — величина окна преобразования;  $K = N - L + 1$ . Также необходимо учесть, что для восстановления пропуска вычисления проводятся итерационно, и, как следствие, сингулярное разложение вычисляется много раз, что сильно увеличивает общее время восстановления. Вычислительная сложность метода наименьших квадратов для авторегрессии —  $O(p^3)$ , где  $p$  — порядок модели авторегрессии. Вычислительная сложность для быстрого преобразования Фурье —  $O(N \cdot \log(N))$ , где  $N$  — длина временного ряда. Таким образом, наиболее эффективным с точки зрения скорости вычисления будет алгоритм на основе преобразования Фурье, далее располагается алгоритм на основе модели авторегрессии, и самые высокие вычислительные затраты соответствуют алгоритму на основе метода «Гусеница-SSA». В итоге, с точки зрения вычислительных затрат и точности восстановления, рекомендуется алгоритм на основе модели авторегрессии.

Согласно предложенному методу контроля состояния, выделенные из одномерных или многомерных контролируемых сигналов признаки  $\mathbf{F}(t, 1..K)$  в момент времени  $t$  используются классификатором для идентификации состояния. В качестве такого классификатора в диссертации рассматривается классификатор «нейронные облака» («НО»). «Нейронные облака» оценивают нелинейную, нечеткую функцию принадлежности данных (признаков  $\mathbf{F}^{об}$ ) к области нормального состояния для исходного «нормального» множества признаков. Затем функция принадлежности используется для оценки принадлежности новых экземпляров данных к области нормального поведения. Выходной сигнал «НО» — значение

от 0 до 1. Значения, близкие к 1, отражают нормальное поведение, а близкие к 0 — аномальное. Таким образом, «НО» позволяют давать оценку близости текущего состояния объекта к нормальному, что может быть использовано при принятии решения. По сути «НО» — это нечеткая нейронная сеть (рисунок 5), образованная смесью радиальных базисных функций (РБФ):

$$R_i = e^{-\frac{\|\mathbf{F}-\mathbf{m}_i\|^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

где  $\mathbf{m}_i$  — вектор средних  $i$ -й РБФ;  $\sigma$  — СКО РБФ;  $\mathbf{F}(t,1\dots K)$  — входные признаки. Сумма всех РБФ дает функцию принадлежности (рисунок 5). Параметры  $m_i$  и  $\sigma$  оцениваются в процессе обучения. Нормализация применяется для того, чтобы получить выходное значение функции принадлежности в интервале от 0 до 1.

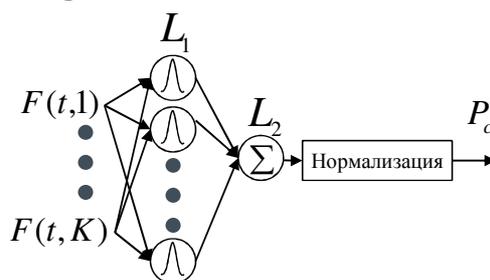


Рисунок 5 — «Нейронные облака»:  $L_1$  — РБФ;  $L_2$  — суперпозиции РБФ;  $P_c$  — значение функции принадлежности

Частотно-временное преобразование (ЧВП) сигналов позволяет в условиях непараметрической априорной неопределённости анализировать динамические свойства сигналов, а также обнаруживать различные виды сингулярностей в их поведении, что закладывает определённую универсальность в применении алгоритмов на их основе как для контроля динамических свойств сигналов в интервале часов, дней или месяцев (уровень воды, поровое давление), так и для обнаружения внезапных воздействий (акселерометры и/или инклинометры). Наиболее часто используемые методы ЧВП: оконное преобразование Фурье (ОПФ) и вейвлет-преобразование. ОПФ, в отличие от преобразования Фурье, представляет сигнал в частотно-временной области путем расчета спектра в сдвигающемся по времени окне.

Вейвлет-преобразование (wavelet transform) — это метод частотно-временного (масштабно-временного, в терминологии теории вейвлетов) разложения сигнала с использованием цифровых вейвлет-фильтров. Вейвлет-преобразование делят на два вида: непрерывное вейвлет-преобразование (НВП) и дискретное вейвлет-преобразование (ДВП). В отличие от ОПФ, ДВП имеет лучшую локализацию базиса разложения (вейвлет) во времени, а также представляет сигнал в виде меньшего числа компонент разложения.

Алгоритм контроля состояния дамб на основе частотно-временного анализа одномерных контролируемых сигналов заключается в применении к сигналу оконного преобразования Фурье (ОПФ, рисунок 6, а) или дискретного вейвлет-преобразования (рисунок 6б). В качестве классификатора используются «НО».

Алгоритм состоит из двух основных этапов.

Этап 1-й — к контролируемому сигналу с датчика применяется ЧВП (ОПФ или ДВП). В случае ОПФ на выходе классификатора имеются амплитуды частот спектра (рисунок 6, а). В случае ДВП выполняется дополнительная обработка вейвлет-коэффициентов уровней разложения, направленная на расчет локальных СКО коэффициентов во времени. Локальные СКО характеризуют локальную мощность (дисперсию), но менее чувствительны к малым изменениям в сигнале, в отличие от мощности (дисперсии) (рисунок 6, б). Таким образом, формируется вектор признаков  $\mathbf{F}(t, 1..K)$  для данного момента времени  $t$ , где  $K$  — число уровней ДВП или частот ОПФ.

Этап 2-й — классификатор «НО», обученный ранее на историческом множестве признаков  $F^{об}$ , соответствующих нормальному состоянию, оценивает степень принадлежности  $P_c(t)$  признаков к аномальному состоянию.



Рисунок 6 — Алгоритмы контроля на основе ЧВП одномерных сигналов: а — с применением ОПФ; б — с применением ДВП

Апробация алгоритмов проводилась на реальных данных системы контроля, в которых присутствовали примеры аномального состояния, а также на реальных данных, в которые добавлялись искусственные аномалии.

Ввиду отсутствия моделей аномального поведения сигналов, соответствующих аномальному состоянию дамбы, были сгенерированы следующие виды аномального поведения сигналов, наиболее часто встречающиеся в технических системах (R. Isermann): (одиночный выброс с изменяемой величиной относительно СКО сигнала); «шум» (белый гауссов шум с изменяемой СКО шума относительно СКО сигнала); «разладка» (с изменяемой величиной относительно СКО сигнала); «замирание сигнала» (сигнал принимает постоянное значение с изменяемой во времени шириной окна замирания); случайное «искажение спектра» сигнала (амплитуды частоты в спектре ранжируются случайным образом с изменяемой во времени шириной окна, в котором происходит искажение). Также в настоящей работе «НО» сравнивались с другими методами идентификации состояния (классификаторами), применяемыми для решения этой задачи: смесь нормальных распределений (СНР), нормальное распределение (НР), одноклассовый метод опорных векторов (ОМОВ).

Достоверность контроля оценивалась условными вероятностями ложноположительного  $P(H_1/H_0)$  (ложная тревога, условный риск изготовителя) и ложноотрицательного  $P(H_0/H_1)$  (пропуск аномалии, условный риск заказчика) срабатывания, где  $H_0$ ,  $H_1$  — гипотеза об аномальном и нормальном состоянии соответственно.

Условные вероятности ложноположительного срабатывания для разных комбинаций классификаторов и методов выделения признаков, полученные по результатам апробации, представлены в таблице 1, наилучшие результаты показала комбинация ДВП и «НО».

Таблица 1 — Условные вероятности ложноположительного срабатывания (условный риск изготовителя) для алгоритмов контроля состояния дамб на основе анализа одномерных контролируемых сигналов

Метод выделения признаков	«НО»	ОМОВ	СНР	НР
Без выд. признаков	$1,41 \cdot 10^{-2}$	$1,62 \cdot 10^{-2}$	$1,33 \cdot 10^{-2}$	$1,54 \cdot 10^{-2}$
ОПФ	$0,49 \cdot 10^{-2}$	$1,35 \cdot 10^{-2}$	$0,71 \cdot 10^{-2}$	$0,64 \cdot 10^{-2}$
ДВП	$0,13 \cdot 10^{-2}$	$0,74 \cdot 10^{-2}$	$0,49 \cdot 10^{-2}$	$0,38 \cdot 10^{-2}$

На рисунке 7 представлены примеры зависимостей условных вероятностей ложноотрицательного срабатывания от изменяющихся параметров искусственных аномалий — «разладка» и «искажения спектра», выброса и шума алгоритмов контроля на основе ОПФ, и ДВП. Для алгоритма контроля на основе ДВП и «НО» условные вероятности ложноотрицательного срабатывания для аномалии вида «разладка» при отношении величины «разладки» к СКО сигнала равного 1 составляют 0,1320, при отношении равного 2 — 0,0017. Условные вероятности ложноотрицательного срабатывания для аномалии

«искажение спектра» при окне искажения 15 отсчетов (3 часа 45 минут) составляют 0,0520, при 25 отсчетах (6 часов 15 минут) — 0,0050.

Пример обнаружения реальной аномалии дамбы в городе Бостоне (сигнал № 1, рисунок 11) представлен на рисунке 7б. Локальное сползание внешнего откоса дамбы в результате эрозии почвы произошло 12 января 2012 года. Аномалия проявилась в поведении сигнала датчика порового давления (рисунок 8, а; рисунок 8, б) как демпфирование колебаний порового давления. Этот датчик установлен на глубине  $-2,20$  м от поверхности. Значение функции принадлежности на участке после 2 января падает к 0, что соответствует аномальному состоянию (рисунок 8, в). Таким образом, эрозия почвы была обнаружена на 10 дней раньше сползания откоса дамбы.

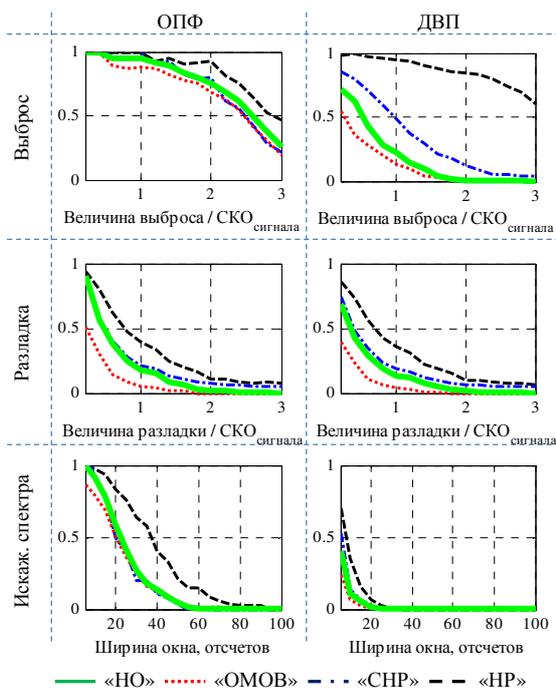


Рисунок 7 — Зависимость вероятности ложноположительного срабатывания от параметров искусственной аномалии

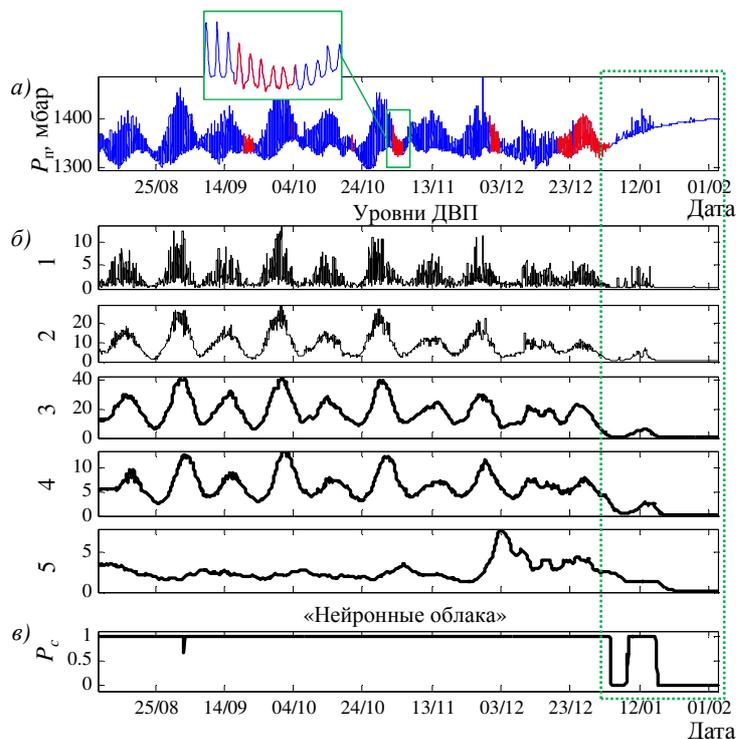


Рисунок 8 — Пример обнаружения аномалий в ходе сползания внешнего откоса бостонской дамбы, алгоритмом контроля состояния дамб на основе ДВП одномерных контролируемых сигналов (красный — восстановленные участки сигнала); б — локальные СКО уровней ДВП; в — значение функции принадлежности «НО»

Как показал сравнительный анализ, на искусственно сгенерированных аномалиях алгоритм контроля состояния дамб на основе ДВП демонстрирует лучшие результаты, чем алгоритм на основе ОПФ. Причина заключается в том, что вейвлет-базис ДВП имеет лучшую локализацию аномалий во времени, чем ОПФ, а также дает на вход классификатора меньшее количество признаков (уровней ДВП), что позволяет оценивать «НО» меньшее число параметров и повышает робастность классификатора. Комбинация ДВП и «НО» по вероятности ложноположительного срабатывания практически не уступает комбинации ДВП и ОМОВ (таблица 1), но существенно превосходит по вероятности ложноположительного срабатывания.

При наличии нескольких датчиков, сигналы которых зависимы между собой, можно применять алгоритмы контроля на основе анализа зависимостей между контролируемыми сигналами, таким образом, обнаруживая аномалии в физических процессах, происходящих в дамбе. Если, например, переливание гребня дамбы может быть обнаружено с помощью сравнения уровня воды с пороговым, то более сложные аномалии, вызванные процессами внутренней эрозии, могут быть обнаружены путем анализа зависимостей между сигналами

уровня воды и давления воды в порах почвы (поровое давление) или между сигналами порового давления датчиков, установленных во внешнем или внутреннем откосе дамбы.

Для анализа и контроля зависимостей между сигналами можно использовать модель вход-выход (англ. — input-output model, оценивание одного сигнала через другой) или методы, которые позволяют оценивать допуски для нормального состояния без выделения признаков из сигналов (например, применение «НО» напрямую к сигналам без предварительного выделения признаков). В первом случае существует проблема устойчивости и идентификации модели вход-выход. Алгоритмы, основанные на оценивании допусков для многомерных контролируемых параметров, не имеют проблем, связанных с устойчивостью и идентификацией, но не позволяют учитывать частотно-временные свойства сигналов, а лишь показывают превышение ими критических значений, поэтому аномальные состояния, проявляющиеся в динамике сигналов, не будут обнаружены. Из сказанного следует, что необходим алгоритм, который, с одной стороны, позволял бы учитывать частотно-временные зависимости между сигналами, с другой стороны, не имел бы проблем, связанных с устойчивостью и идентификацией. Для решения этой задачи предложен алгоритм контроля на основе ЧВП (а именно ДВП) многомерных сигналов.

Алгоритм контроля состояния дамб на основе модели вход-выход между контролируемыми сигналами заключается в оценивании линейной зависимости между сигналами датчиков, установленных в дамбу (рисунок 9, а). Модель оценивается по данным о нормальном состоянии дамбы. Далее, во время контроля состояния дамбы проверяется, сохраняется зависимость или нет. Если зависимость не сохраняется и ошибка модели увеличивается, то это сигнал аномального состояния. Ошибка модели вычисляется как разность между реальным значением сигнала и значением, оцененным моделью для данного момента времени (рисунок 9, а). Ошибка модели (которая является признаком  $F(t, 1)$ ) затем подается на вход классификатора «НО», на выходе которого значение функции принадлежности к области нормального состояния  $P_c(t)$ .

Алгоритм контроля состояния дамб на основе анализа частотно-временных зависимостей между контролируемыми сигналами заключается в применении ДВП к многомерным контролируемым сигналам. Для идентификации состояния используется классификатор «НО». Блок-схема алгоритма обнаружения аномального состояния представлена на рисунок 9, б. Алгоритм контроля на основе ДВП многомерных сигналов состоит из следующих этапов (см. рисунок 9, б):

Этап 1-й — применение ДВП к каждому сигналу и дополнительная обработка вейвлет-коэффициентов, направленная на расчет локальных СКО во времени для каждого уровня разложения, характеризующих мощность каждого уровня. Таким образом, формируется вектор признаков  $F(t, 1..K)$  для данного момента времени  $t$ , где  $K$  — число уровней ДВП.

Этап 2-й — для одинаковых уровней разложения сигналов строятся совместные функции принадлежности к области нормального состояния для исходных «нормальных» исторических значений локальных СКО уровней разложения с использованием алгоритма «НО». Выход «НО» каждого уровня разложения нормируется в соответствии с мощностным вкладом данного уровня разложения в суммарную мощность отобранных для анализа уровней ДВП. Такая нормировка необходима для комбинирования выходов различных классификаторов. Состояние определяется как суммарный взвешенный вклад от каждого уровня разложения.

Этап 3-й — на выходе алгоритма — значение функции принадлежности  $P_c(t)$  «НО» к области аномального состояния.

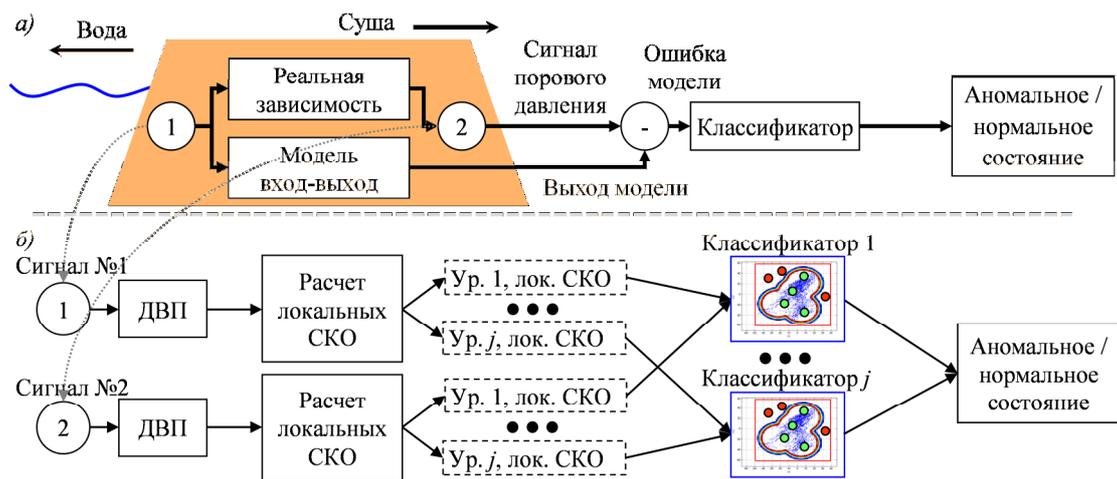


Рисунок 9 — Алгоритмы для контроля состояния дамб на основе анализа зависимостей между контролируемыми сигналами: а — с применением модели вход-выход; б — с применением ДВП

Как и в случае алгоритмов для контроля одномерных сигналов, апробация многомерных алгоритмов проводилась на реальных данных системы контроля, в которых присутствовали примеры аномального состояния, а также на реальных данных, в которые добавлялись искусственные аномалии.

Вероятности ложноположительного срабатывания для алгоритмов на основе ДВП, модели вход-выход и без выделения признаков, полученные по результатам апробации, представлены в таблице 2 — наилучшие результаты показал алгоритм на основе ДВП многомерных сигналов.

Таблица 2 — Условные вероятности ложноположительного срабатывания (условный риск изготовителя) для алгоритмов для контроля состояния дамб на основе анализа зависимостей между контролируемыми сигналами.

Алгоритм	Условная вероятность ложноположительного срабатывания
Без выделения признаков	$4,1 \cdot 10^{-2}$
На основе модели вход-выход	$0,21 \cdot 10^{-2}$
На основе анализа частотно-временных зависимостей между контролируемыми сигналами	$0,14 \cdot 10^{-2}$

На рисунке 10 представлены примеры зависимостей вероятности ложноотрицательного срабатывания от параметров искусственных аномалий для трех разных случаев: без предварительного выделения признаков, алгоритм на основе модели вход-выход, алгоритм на основе ДВП. Показано, что наилучшие результаты — у алгоритма контроля на основе ДВП. Условные вероятности ложноотрицательного срабатывания для аномалии «искажение спектра» составляет при окне искажения 15 отсчетов (3 часа 45 минут) составляет 0,0494, при 25 отсчетах (6 часов 15 минут) — 0,0048. Для алгоритма на основе модели вход-выход: 15 отсчетов (3 часа 45 минут) составляет 0,1248, при 25 отсчетах (6 часов 15 минут) — 0,0130.

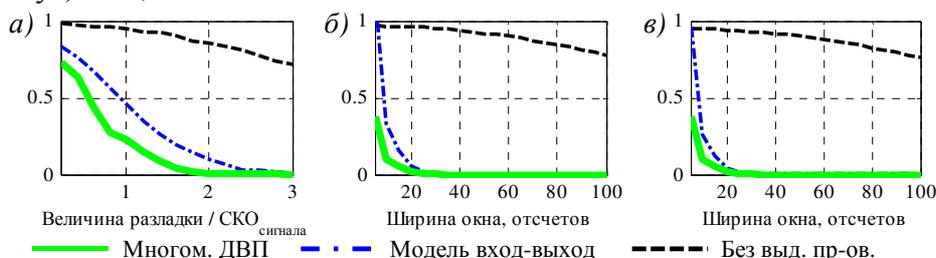


Рисунок 10 — Зависимость условной вероятности ложноотрицательного срабатывания (условный риск заказчика) для алгоритмов контроля состояния дамб на основе анализа зависимостей между контролируемыми сигналами: а — «выброс»; б — замирание сигнала; в — «искажение спектра»

Пример обнаружения реальной аномалии бостонской дамбы (сползание внешнего откоса дамбы произошло 12 января 2012 года) представлен для сигналов датчиков, расположенных у внешнего (сигнал № 1) и внутреннего (сигнал № 2) откосов дамбы (рисунок 11). Рассмотрим классификацию наиболее мощного, 4-го уровня разложения. Для сигнала № 1 видно демпфирование колебаний порового давления после 1 января и, как следствие, падение СКО после 1 января, вызванное изменением свойств дамбы в результате эрозии (рисунок 12). Значение функции принадлежности на участке после 2 января падает к 0, что соответствует аномальному состоянию (рисунок 12, в). Таким образом, эрозия почвы была обнаружена на 10 дней раньше сползания откоса дамбы. Также присутствует локальный участок 7 декабря, в котором значение функции принадлежности падает до 0,1, данный участок соответствует ложному срабатыванию, которое вызвано отсутствием подобного поведения в обучающем множестве (рисунок 13, а). Подобное поведение характерно для 3-го и 5-го уровней разложения. Суммарный взвешенный вклад всех уровней разложения тоже стремится к 0 после 2 января (рисунок 13, в). 7 декабря присутствует локальный участок ложного срабатывания, в котором значение функции принадлежности падает к 0,15, что вызвано отсутствием такого поведения в обучающем множестве.

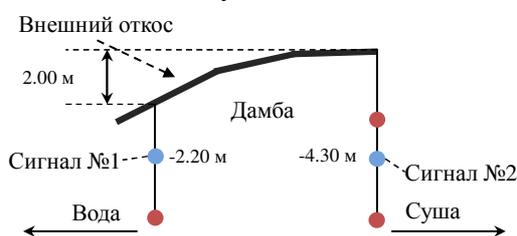


Рисунок 11 — Структура анализируемой кросс-секции бостонской дамбы

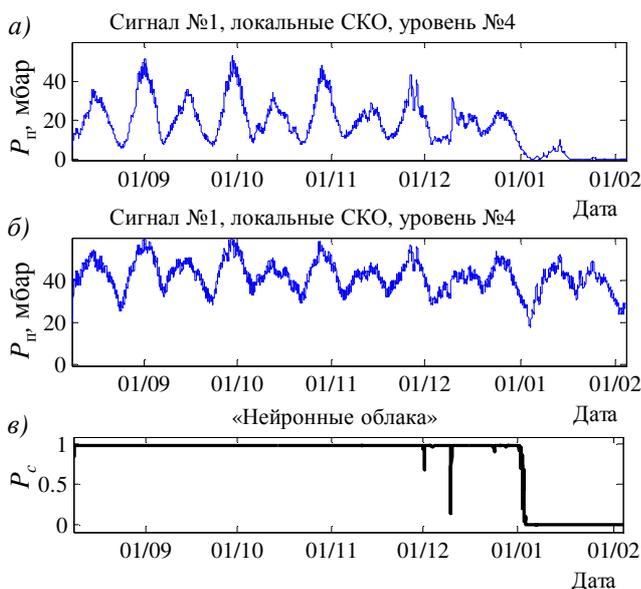


Рисунок 12 — Уровень ДВП №4: а — локальные СКО сигнал №1; б — локальные СКО сигнал №2; в — значение функции принадлежности «НО»

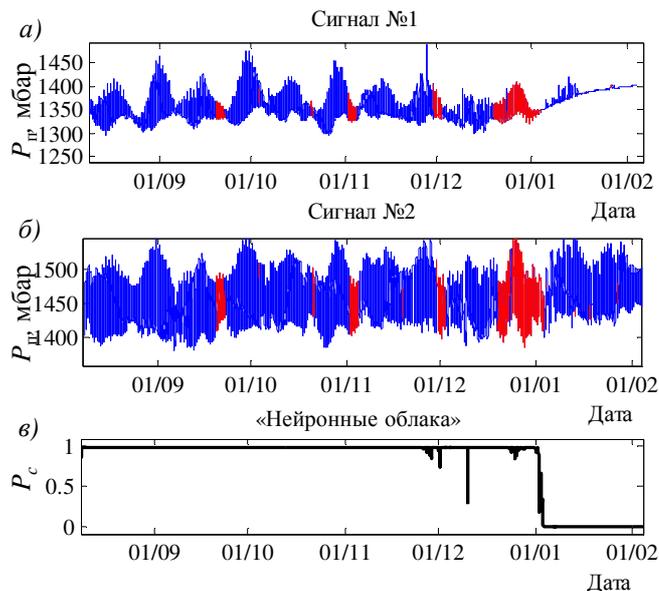


Рисунок 13 — Результирующие значение функции принадлежности (красный — восстановленные участки сигнала): а — сигнал №1; б — сигнал №2; в — результирующие значение функции принадлежности «НО»

Как показал сравнительный анализ, на искусственно сгенерированных аномалиях алгоритмы контроля на основе анализа зависимостей между контролируемыми сигналами на основе модели вход-выход и ДВП показывают примерно одинаковую точность, но преимущество алгоритма на основе ДВП заключается в том, что отсутствует проблема устойчивости, характерная для модели вход-выход. Так же видно, что многомерный алгоритм на основе ДВП показал лучшие результаты на примере бостонской дамбы (рисунок 13), чем одномерный алгоритм на основе ДВП (рисунок 8).

**Четвертая глава** посвящена апробации алгоритмов контроля состояния дамб, описанных в четвертой главе, на серии экспериментов по разрушению дамб IJkDijk: «Восточная дамба» и «Южная дамба».

Эксперимент «Восточная дамба» был разработан для исследования механизмов разрушения дамбы, вызванных эрозией. Дамба состояла из слоев песка и глины (рисунок 14, а). В песчаный слой дамбы, вдоль внешнего откоса, в два ряда была установлена сеть датчиков порового давления AS 218–AS 222 и AS 213–AS 217. Также был установлен датчик уровня воды в бассейне. В течение эксперимента постепенно повышался уровень воды в бассейне для моделирования механизмов разрушения процессами эрозии.

Эксперимент «Южная дамба» был разработан для анализа структурной устойчивости дамбы к различным видам внешних воздействий (рисунок 14, б). В две кросс-секции дамбы, в различные слои почвы была установлена сеть датчиков инклинометров (пример одной кросс-секции: датчики GA-AG-1–GA-AG-4). Для моделирования механизмов разрушения дамбы создавались следующие воздействия: углубление траншеи возле дамбы перед внешним откосом; закачивание воды в тело дамбы через дренажные трубы; заполнение контейнеров на гребне дамбы водой; заполнение бассейна водой.

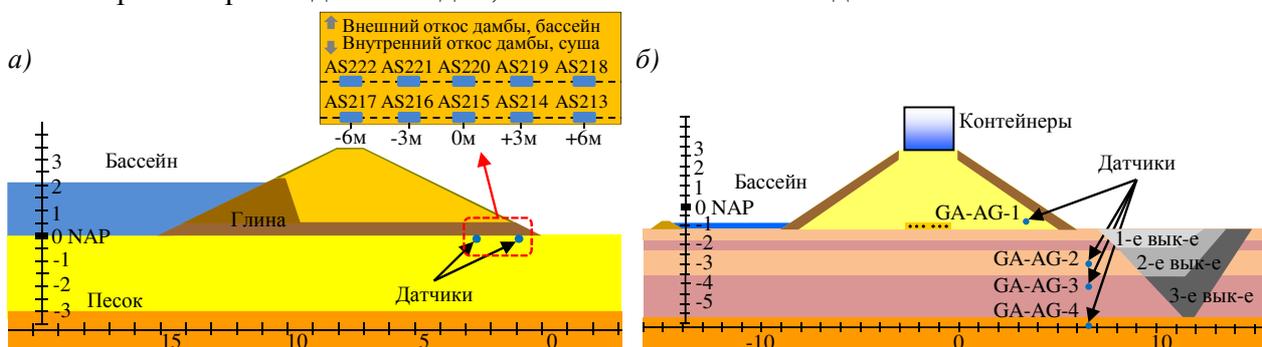


Рисунок 14 — Эксперимент IJkDijk: а — «Восточная дамба»; б — «Южная дамба»

Для «Восточной дамбы» был применен алгоритм контроля состояния на основе модели вход-выход, так как сигналы характеризовались квазистационарным поведением сигналов без колебаний, соответствующих приливам, отливам и другим воздействиям. Модель вход-выход оценивалась между сигналом уровня воды (вход) и сигналом порового давления (выход). На рисунке 15 представлен пример применения алгоритма. Увеличение ошибки модели  $e$  (рисунок 15, б) и падение значения функции принадлежности к 0 соответствуют аномальному состоянию дамбы. Для сигналов датчиков AS 218 после 25.08.2012 в 2:00 значение функции принадлежности  $P_c$  уменьшается до 0,8 и далее до 0 (рисунок 15, в). Прорыв дамбы произошел 27.08.2012 в 11:30, а алгоритм позволил обнаружить критическое состояние 25.08.2012 в 2:00, т.е. аномальное состояние было спрогнозировано за ~55 часов до начала разрушения дамбы, в то время как визуально вымывание грунта было обнаружено 26.08.2012 в 15:17, что соответствует ~37 часам до начала разрушения.

Для «Южной дамбы» был применен алгоритм контроля состояния дамб на основе ДВП одномерных контролируемых сигналов (рисунок 16). Деформация структуры дамбы влияет на показания инклинометров в виде резких скачков в сигналах («разладки»). Деформации структуры дамбы и, как следствие, аномальное поведение сигналов, вызванные выкапыванием траншеи, были обнаружены в сигнале датчика GA-AG-3. Аномалии проявились как скачки локальных СКО уровней вейвлет-преобразования (рисунок 16, б) и были идентифицированы «НО». Деформации структуры дамбы, вызванные выкапываниями траншеи, обозначены рамками № 1 и № 2, заполнение тела дамбы водой — рамками № 3 и № 4, значение функции принадлежности  $P_c$  опускается ниже 0,8 (рисунок 16, в).

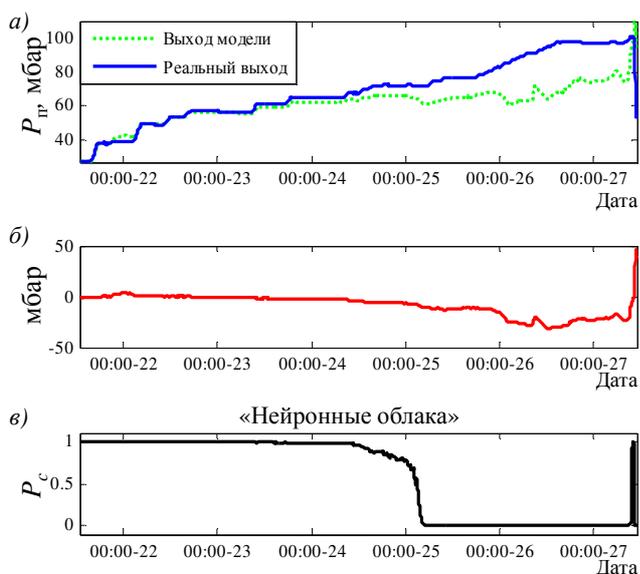


Рисунок 15 — Пример обнаружения аномального состояния с использованием алгоритмом контроля на основе модели вход-выход, датчик порового давления AS 218, «Восточная дамба»: *а* — сравнение реальных и смоделированных сигналов; *б* — ошибка моделирования; *в* — значения функции принадлежности «НО»

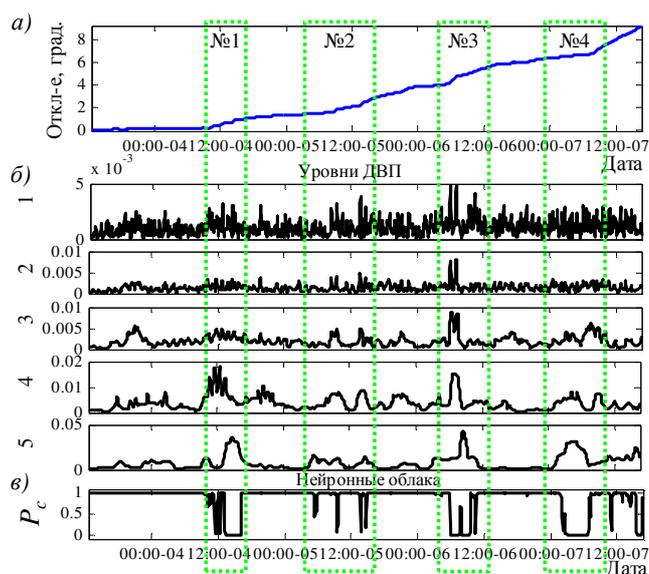


Рисунок 16 — Пример обнаружения аномальных состояний алгоритмом контроля состояния дамб на основе ДВП одномерных контролируемых сигналов, «Южная дамба», инклинометр GA-AG-3: *а* — сигнал инклинометра; *б* — локальные СКО уровней ДВП; *в* — значения функции принадлежности «НО»

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках диссертационного исследования была решена актуальная задача разработки метода и алгоритмов контроля состояния дамб в условиях непараметрической априорной неопределённости, обусловленная отсутствием моделей состояний дамб и многообразием их физической природы, а также отсутствием моделей контролируемых параметров. Отличительная особенность полученных результатов в том, что предложенные метод и алгоритмы контроля состояния дамб основываются на применении интеллектуального анализа данных и могут быть применены для широкой разновидности дамб.

На основании проведенного исследования получены следующие результаты.

1. Разработан метод контроля состояния грунтовых дамб, основанный на применении интеллектуального анализа данных. Метод контроля заключается в выделении признаков из контролируемых сигналов, в которых проявляется аномальное состояние дамбы, с последующей идентификацией состояния дамбы по выделенным признакам, с помощью обучающегося классификатора. Для оценивания области допустимых значений контролируемых параметров предложен классификатор (метод идентификации состояния), способ принятия решения которого основан на оценивании области допустимых значений в процессе обучения по результатам обработки исторических записей контролируемых параметров, соответствующих нормальному состоянию дамбы. Применение разработанного метода позволяет осуществлять эффективный контроль состояния в условиях априорной непараметрической неопределённости моделей состояний, области допустимых значений контролируемых параметров и моделей контролируемых параметров.

2. В рамках предложенного метода контроля разработан алгоритм контроля состояния дамб на основе частотно-временного анализа одномерных контролируемых сигналов. В этом алгоритме для выделения признаков из контролируемых сигналов используется частотно-временное преобразование. Алгоритм позволяет обнаружить аномальное поведение контролируемых сигналов, проявляющееся в их частотно-временных свойствах. Было показано, что на реальных и искусственно сгенерированных аномальных состояниях контролируемых сигналов алгоритм на основе комбинации дискретного вейвлет-

преобразования и классификатора «нейронные облака» демонстрирует наилучшие по критериям условных вероятностей ложноположительного и ложноотрицательного срабатывания результаты контроля состояния по сравнению с другими исследованными методами частотно-временного анализа и классификации. В работе приводилось сравнение следующих методов частотно-временного анализа: дискретного вейвлет-преобразования, оконное преобразование Фурье; и классификаторов: «нейронные облака», нормальное распределение, смесь нормальных распределений, одноклассовый метод опорных векторов. Разработанный алгоритм контроля может применяться для контролируемых сигналов датчиков порового давления, уровня воды, акселерометров и инклинометров.

3. В рамках предложенного метода контроля состояния дамб разработаны алгоритмы контроля на основе анализа зависимостей между контролируемыми сигналами, позволяющие обнаруживать аномалии в физических процессах, происходящих в дамбе, получены следующие результаты:

- Разработан алгоритм контроля состояния дамб на основе модели вход-выход между сигналами (порового давления, или уровня воды и порового давления), позволяющий обнаружить аномальное состояние путем анализа изменений в линейной зависимости между контролируемыми параметрами.
- Разработан алгоритм контроля состояния дамб на основе дискретного вейвлет-преобразования многомерных сигналов (порового давления), позволяющий обнаружить аномальное состояние путем анализа частотно-временных зависимостей между сигналами. Для этого алгоритма отсутствует проблема устойчивости, характерная для алгоритма на основе модели вход-выход.

4. Апробация и сравнение всех алгоритмов проводились на реальных данных системы контроля состояния дамб, расположенных в Великобритании, Голландии и Германии, в рамках проекта UrbanFlood, где была продемонстрирована возможность обнаружения аномальных состояний грунтовых дамб.

- На реальных примерах аномального состояния продемонстрирована возможность их обнаружения во всех экспериментах, исследуемых в диссертации.
- Для искусственно сгенерированных примеров аномального состояния контролируемых сигналов представлены зависимости условных вероятностей ложноотрицательного срабатывания от параметров искусственных аномалий.

Разработанные алгоритмы контроля состояния дамб на основе частотно-временного преобразования одномерных контролируемых сигналов и на основе анализа модели вход-выход между многомерными контролируемыми сигналами были апробированы в рамках полноразмерного эксперимента по разрушению дамб JkDijk, где была продемонстрирована возможность обнаружения аномальных состояний. Во время эксперимента «Восточная дамба» внутренняя эрозия была обнаружена за ~55 часов до разрушения дамбы, в то время как визуально внутренняя эрозия была обнаружена за ~37 часов.

5. Разработан алгоритм на основе модели авторегрессии для восстановления пропусков в исторических записях контролируемых параметров с сохранением частотно-временных свойств восстановленных участков сигналов. Было показано, что по качеству восстановления этот алгоритм превосходит линейную интерполяцию и алгоритм восстановления на основе преобразования Фурье и не уступает алгоритму на основе метода «Гусеница-SSA», при существенно меньших вычислительных затратах.

6. Метод и алгоритмы контроля, исследованные и разработанные в рамках диссертационного исследования, при прямом участии автора, были внедрены компанией ООО «Сименс» (дочерняя компания концерна Siemens AG) в процессе разработки системы для мониторинга и контроля состояния грунтовых дамб (Levee Monitoring), о чем имеется соответствующий акт. Система устанавливалась на дамбах в Нидерландах.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Козионов, А. П. Алгоритм на основе модели передаточной функции и одноклассовой классификации для обнаружения аномального состояния дамб / А. П. Козионов, А. Л. Пяйт, И. И. Мохов, Ю. П. Иванов // Информационно-управляющие системы. — 2015. — № 6(79). — С. 10–16.
2. Козионов, А. П. Алгоритм обнаружения аномального состояния дамбы на основе вейвлет-преобразования и одноклассовой классификации одномерных сигналов / А. П. Козионов, А. Л. Пяйт, И. И. Мохов, Ю. П. Иванов // НТВ СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2015. — № 4 — С. 59–69.
3. Козионов, А. П. Исследование алгоритмов восстановления пропусков в измеряемых сигналах для системы мониторинга состояния дамб / А. П. Козионов, А. Л. Пяйт, И. И. Мохов, Ю. П. Иванов // НТВ СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2015. — № 2/3(217/222) — С. 93–104.
4. Козионов, А. П. Вейвлет-преобразование и одноклассовая классификация для мониторинга состояния дамб / А. П. Козионов, А. Л. Пяйт, И. И. Мохов, Ю. П. Иванов // Информационно-управляющие системы. — 2014. — № 4(71) — С. 24–31.
5. Козионов, А. П. Интеллектуальная система мониторинга состояния объектов критической инфраструктуры / А. Л. Пяйт, И. И. Мохов, А. П. Козионов // Интеграл. — 2013. — № 4. — С. 84–86.
6. Kozionov A. P. Signal analysis and anomaly detection for flood early warning systems / A. L. Pyayt, A. P. Kozionov, V. T. Kuserbaeva, I. I. Mokhov, V. V. Krzhizhanovskaya, J. Broekhuijsen, R. J. Meijer, P. M. A. Sloot // Journal of Hydroinformatics. — 2014. — No. 5. — P. 1025–1043.
7. Kozionov A. P. Time-Frequency Methods for Structural Health Monitoring / A. L. Pyayt, A. P. Kozionov, I. I. Mokhov, B. Lang, R. J. Meijer, V. V. Krzhizhanovskaya, P. M. A. Sloot // Sensors (MDPI). — 2014. — No. 3(14). — P. 5147–5173.
8. Pat. WO2014/148934. Method for monitoring a structure and monitoring device for the structure / Kozionov A. P., Mokhov I. I., Pyayt A. L., Shevchenko D.; приоритетная заявка PCT/RU2013/000210; опублик. 18.03.2013 (EC).
9. Pat. WO2014/182191. Device for surveillance of an artificial structure / Kozionov A. P., Pyayt A. L., Kuserbaeva V. T.; приоритетная заявка PCT/RU2013/000391; опублик. 13.11.2014 (EC).
10. Pat. WO2014/148933. Method and monitoring device for monitoring a structure / Kozionov A.P., Mokhov I.I., Pyayt A.L.; приоритетная заявка PCT/RU2013/000209; опублик. 25.09.2014 (EC).
11. Pat. WO2013/144066. Method for monitoring a structure based on measurements of a plurality of sensors / Kozionov A. P., Mokhov I. I., Pyayt A. L.; приоритетная заявка PCT/EP2013/056222; 03.10.2013 (EC).
12. Козионов, А. П. Исследование алгоритма восстановления пропусков в измеряемых сигналах на основе модели авторегрессии для системы мониторинга состояния дамб / А. П. Козионов, А. Л. Пяйт, И. И. Мохов // XVII конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». — СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2015. — С. 291–298.
13. Kozionov A. P. An approach for real-time levee health monitoring using signal processing methods / A. L. Pyayt, A. P. Kozionov, I. I. Mokhov, B. Lang, V. V. Krzhizhanovskaya, P. M. A. Sloot // Proceedings of the International Conference on Computational Science (ICCS) 2013, Procedia Computer Science 18 (2013). — Barcelona, Spain — P. 2357–2366.
14. Козионов, А. П. Интеллектуальная обработка сигналов для мониторинга состояния дамб / А. П. Козионов, А. Л. Пяйт, В. Т. Кушербаева // XV конференция молодых ученых

- «Навигация и управление движением». — СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2013. — С. 133–140.
15. Kozionov A. Intelligent signal processing for dike health monitoring / A. Kozionov, A. Pyayt, V. Kusherbaeva // Automation & Control: proceedings of the International Conference of Young Scientists. — St. Petersburg, St. Petersburg State Polytechnical University, 2013. — P. 188–193.
  16. Козионов, А. П. Исследование метода частотно-временного анализа и классификации сигналов для обнаружения аномального поведения объектов / А. П. Козионов, А. Л. Пяйт, И. И. Мохов, Ю. П. Иванов // Научная сессия ГУАП. — СПб.: ГУАП, 2013 — С. 22–23.
  17. Kozionov A. P. Data-driven modelling for flood defence structure analysis / A. L. Pyayt, I. I. Mokhov, A. P. Kozionov, V. T. Kusherbaeva, B. Lang, V. V. Krzhizhanovskaya, R. J. Meijer // Proceedings of the 2nd European Conference on FLOODrisk Management. — Rotterdam, The Netherlands. — P. 301–306.