На правах рукописи

Тевяшов Глеб Константинович

Информационное обеспечение цифровой технологии инфокоммуникационной системы экологического мониторинга подводной среды

Специальность: 2.3.8. Информатика и информационные процессы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН), г. Москва.

Научный руководитель: **Мещеряков Роман Валерьевич – доктор технических наук, профессор**

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»**

Ученый секретарь

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Сохранение благоприятного состояния окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов требуют систематического наблюдения за природными объектами, оценивания происходящих изменений и прогнозирования их развития. Особое значение имеет экологический мониторинг подводной среды, охватывающий состояние водной среды, гидробионтов и подводной инфраструктуры. Проведение таких наблюдений осложняется ограниченной доступностью объектов, изменчивостью условий среды и необходимостью применения различных технических средств.

Информация, поступающая от средств наблюдения, различается по составу, форме представления, пространственно-временной привязке, периодичности и полноте. Ее совместное использование требует автоматизации регистрации, передачи, хранения, согласования и интерпретации для своевременного формирования результатов мониторинга. Эти задачи решаются в инфокоммуникационных системах экологического мониторинга подводной среды, объединяющих средства наблюдения, вычислительной техники и связи.

Вместе с тем существующие инфокоммуникационные системы преимущественно разрабатываются для конкретных задач и заранее определенного состава технических средств. Изменение задач и условий мониторинга требует пересмотра состава компонентов, информационных ресурсов и связей между ними. Проведенный анализ показал недостаточную представленность общих подходов к описанию последовательных информационных процессов, совместному оцениванию состояния подводной среды с учетом разнородности и неполноты информации, а также автоматизированному формированию специализированных архитектур программно-аппаратных комплексов.

Степень разработанности темы исследования. Тематика диссертационного исследования связана с экологическим мониторингом природной среды, описанием и организацией информационных процессов, информационным обеспечением цифровых технологий, архитектурным проектированием инфокоммуникационных систем, методами распознавания состояния и подводной робототехникой. Теоретические основы, организационные принципы и прикладные вопросы экологического мониторинга представлены в работах R.E. Munn, Ю.А. Израэля, И.П. Герасимова, Ф.Я. Ровинского, В.Е. Соколова, К.А. Вытовтова. Вопросы моделирования, представления информации, организации информационных и управленческих процессов, построения вычислительных и информационно-управляющих систем исследовались в работах Д.А. Новикова, А.А. Захаровой, Р.В. Мещерякова, И.А. Каляева. Развитию подводной робототехники, навигации, управления подводными аппаратами и технологий обследования подводных объектов посвящены работы T.I. Fossen, J.J. Leonard, D.R. Yoerger, L.L. Whitcomb, J.G. Bellingham, М.Д. Агеева, Л.В. Киселева, Д.В. Войтова, В.Ф. Филаретова. Теоретические основы и прикладные методы распознавания образов, вероятностного и нечеткого вывода, машинного обучения, компьютерного зрения, а также их применения в интеллектуальных и

информационно-измерительных системах представлены в работах J. Pearl, L. Zadeh, Y. LeCun, G. Hinton, Y. Bengio, Ю.И. Журавлева, К.В. Рудакова, Ю.В. Визильтера, А.В. Конушина, А.Л. Ронжина, Е.А. Барабановой.

Цель исследования – повышение эффективности проектирования и функционирования инфокоммуникационной системы экологического мониторинга подводной среды за счет разработки информационного обеспечения цифровой технологии.

Для достижения сформулированной цели требуется выполнить следующие **задачи исследования**:

1) Провести анализ существующих программно-аппаратных комплексов инфокоммуникационных систем экологического мониторинга подводной среды и методов обработки и интерпретации информации для выявления ограничений существующих решений и обоснования необходимости разработки информационного обеспечения цифровой технологии инфокоммуникационной системы экологического мониторинга подводной среды.

2) Разработать модель описания информационных процессов для формирования информационного обеспечения цифровой технологии инфокоммуникационной системы экологического мониторинга подводной среды.

3) Разработать метод распознавания состояния подводной среды на основе нейронечеткой интерпретации и байесовского объединения разнородной информации для автоматизированного оценивания и прогнозирования состояния подводной среды.

4) Разработать обобщенную архитектуру программно-аппаратного комплекса инфокоммуникационной системы экологического мониторинга подводной среды и методику формирования специализированных архитектур для конкретных задач и условий мониторинга.

5) Провести вычислительный эксперимент и прикладную апробацию модели описания информационных процессов, метода распознавания состояния подводной среды и методики формирования специализированной архитектуры для оценки эффективности проектирования и функционирования инфокоммуникационной системы экологического мониторинга подводной среды.

Объект исследования – инфокоммуникационные системы экологического мониторинга подводной среды.

Предмет исследования – информационное обеспечение цифровой технологии инфокоммуникационной системы экологического мониторинга подводной среды.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке:

– **Модели описания** информационных процессов цифровой технологии инфокоммуникационной системы экологического мониторинга подводной среды, отличающейся единым описанием состава используемой информации, ее источников, условий получения, координатно-временной привязки и взаимосвязи результатов последовательных информационных процессов, что позволяет формировать из разнородных наблюдений набор информации текущей расчетной итерации для последующего оценивания и прогнозирования состояния подводной

среды (*соответствует п. 1 паспорта научной специальности 2.3.8 «Информатика и информационные процессы»*).

– **Метода распознавания** состояния подводной среды, отличающегося адаптивной фильтрацией наблюдений с учетом контекста и условий их получения, нейронечеткой интерпретацией наблюдаемых признаков и их байесовским объединением, что позволяет выполнять оценивание и прогнозирование состояния подводной среды при разнородности и неполноте исходной информации (*соответствует пп. 7, 13 паспорта научной специальности 2.3.8 «Информатика и информационные процессы»*).

– Обобщенной **архитектуры программно-аппаратного комплекса** инфокоммуникационной системы экологического мониторинга подводной среды, отличающейся разделением общих функциональных компонентов и модулей, выбираемых в зависимости от задачи мониторинга, организацией специализированной обработки по форме представления информации и методикой формирования специализированной архитектуры с проверкой требований и критериев, что позволяет определять состав и взаимодействие программных и аппаратных компонентов для конкретных задач и условий мониторинга без изменения общей архитектурной основы (*соответствует п. 9 паспорта научной специальности 2.3.8 «Информатика и информационные процессы»*)

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в развитии подходов к описанию и организации информационных процессов цифровой технологии инфокоммуникационной системы экологического мониторинга подводной среды. Модель описания информационных процессов цифровой технологии устанавливает состав используемой информации, ее источники, условия получения, координатно-временную привязку и связи между результатами последовательных информационных процессов. Разработанный метод распознавания состояния подводной среды определяет последовательность формирования результатов оценивания и прогнозирования при использовании разнородной и неполной информации. Разработанная обобщенная архитектура программно-аппаратного комплекса и методика формирования специализированной архитектуры определяют порядок построения инфокоммуникационной системы для конкретной задачи и условий мониторинга.

Полученные результаты формируют теоретическую основу информационного обеспечения цифровой технологии инфокоммуникационной системы экологического мониторинга подводной среды. При переходе к новой задаче мониторинга сохраняются общие принципы построения архитектуры, порядок выполнения информационных процессов и правила описания используемой информации, а состав программно-аппаратных средств и информационных ресурсов определяется конкретными условиями мониторинга.

Практическая значимость результатов диссертационного исследования подтверждается их использованием при выполнении научно-исследовательских работ (НИР):

– НИР «Теория и методы управления безопасным функционированием гетерогенных интеллектуальных робототехнических систем» (2018-2021 гг.);

– НИР «Теория, методы и информационные технологии управления сложными системами» (2022-2024 гг.);

– НИР «Разработка модели интеллектуального группового взаимодействия воздушных судов и других элементов беспилотной авиационной транспортной системы с реализацией программных модулей оптимизации загруженности транспортных потоков», шифр «ВИАС-МОДЕЛЬ-2022» (2022 г.).

Разработанные решения апробированы в задачах наблюдения за параметрами водной среды, определения характеристик гидробионтов и других биологических объектов по визуальной информации, а также контроля подводной инфраструктуры. Их применение позволяет использовать общую архитектурную основу, разработанный метод и единые правила описания информации при создании инфокоммуникационных систем экологического мониторинга подводной среды для различных задач и условий наблюдения.

Результаты диссертационного исследования внедрены в Институте «Казанская академия ветеринарной медицины имени Н.Э. Баумана» ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», что подтверждается актом внедрения. Разработанные решения использовались при создании цифрового аквакультурного комплекса для проведения исследований по выращиванию клариевого сома и осетровых рыб, в том числе при решении задач визуального распознавания и подсчета рыб, определения их размеров и оценивания двигательной активности.

Результаты диссертационного исследования внедрены также в Ассоциации субъектов инновационной деятельности в горной отрасли «Инновационные горные технологии» (г. Москва), что подтверждается актом внедрения.

Методология и методы исследования. В диссертационной работе применяются методы системного анализа, описания и организации информационных процессов, архитектурного проектирования программно-аппаратных комплексов. При разработке метода распознавания состояния подводной среды используются методы распознавания образов, компьютерного зрения, машинного обучения, нечеткой логики и байесовского вывода. Проверка разработанных решений проводится с использованием имитационного моделирования, вычислительного эксперимента и сравнительного анализа.

Положения, выносимые на защиту:

1) **Модель описания** информационных процессов цифровой технологии инфокоммуникационной системы экологического мониторинга подводной среды определяет состав используемой информации, ее источники, условия получения, координатно-временную привязку и связи между результатами последовательных информационных процессов.

2) **Метод распознавания** состояния подводной среды, включающий формирование контекста наблюдения, адаптивную фильтрацию данных с учетом условий их получения, нейронечеткую интерпретацию наблюдаемых признаков и байесовское объединение свидетельств, обеспечивает оценивание и

прогнозирование состояния подводной среды при разнородности и неполноте исходной информации.

3) Обобщенная **архитектура программно-аппаратного комплекса** инфокоммуникационной системы экологического мониторинга подводной среды определяет общую архитектурную основу системы и порядок ее специализации в зависимости от конкретной задачи и условий мониторинга.

Степень достоверности. Достоверность результатов исследования обосновывается последовательным описанием модели описания информационных процессов цифровой технологии, метода распознавания состояния подводной среды и обобщенной архитектуры программно-аппаратного комплекса, а также проверкой разработанных решений в вычислительном эксперименте и прикладных задачах. Метод распознавания состояния подводной среды проверен на сценариях изменения температуры воды и двигательной активности гидробионтов с сопоставлением полученных результатов оценивания и прогнозирования с заданными состояниями. Применимость обобщенной архитектуры и методики формирования специализированной архитектуры показана при формировании программно-аппаратных комплексов для различных задач мониторинга. Применимость модели описания информационных процессов подтверждена при формировании и использовании информации в вычислительном эксперименте и прикладных задачах экологического мониторинга подводной среды.

Апробация результатов. Диссертационная работа и ее основные результаты обсуждались и докладывались на следующих научных международных, всероссийских конференциях и семинарах: *Agriculture Digitalization and Organic Production (ADOP* –Санкт-Петербург (2023)*;* Минск (2024); Барнаул (2025); Калининград (2026); Международная конференция *«*Информационные технологии и технические средства управления*» / International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT* – Гомель (2025)*;* Международная научно-практическая конференция «Цифровизация агропромышленного комплекса» (Цифровизация АПК – Тамбов (2024); Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами» (УБС – Новочеркасск (2024), Тамбов (2025); Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Программная инженерия: современные тенденции развития и применения» (ПИ – Курск (2023)).

Публикации по теме диссертационного исследования. По материалам диссертации опубликованы 16 печатных работ из них 4 статьи из Белого списка, а также 5 в изданиях международной системы цитирования Web of Science и Scopus, 5 статей уровня РИНЦ, получены 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад. Все положения, выносимые на защиту, получены лично автором. Постановка задачи исследования осуществлялась совместно с научным руководителем, доктором технических наук, профессором Р.В. Мещеряковым. Автором разработаны модель описания информационных процессов цифровой технологии инфокоммуникационной системы экологического мониторинга

подводной среды, метод распознавания состояния подводной среды, а также обобщенная архитектура программно-аппаратного комплекса и методика формирования специализированной архитектуры, составляющие основные результаты диссертационного исследования. Личный вклад соискателя в работы, выполненные в соавторстве, представлен в заключении диссертации.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка понятий и определений, сокращений, списка литературы и 5 приложений. Объем работ составляет 163 печатные страницы, 26 рисунков, 13 таблиц. Список литературы содержит 120 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность разработки информационного обеспечения цифровой технологии, сформулированы научно-техническая задача, цель и задачи исследования, определены объект, предмет, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Представлены положения, выносимые на защиту, сведения о достоверности, реализации, внедрении и апробации результатов, публикациях и личном вкладе соискателя.

В **первой главе** рассмотрены цели и задачи экологического мониторинга подводной среды, проанализированы технические решения инфокоммуникационных систем для наблюдения за водной средой, гидробионтами и подводной инфраструктурой, включая комбинированные системы. Установлено, что существующие решения преимущественно ориентированы на конкретные задачи и состав технических средств, что затрудняет их применение при изменении условий мониторинга.

Проанализированы статистические методы и методы анализа временных рядов, машинного обучения и распознавания образов, вероятностные методы, байесовский вывод, методы нечеткой логики, экспертные и сценарные подходы. Показано, что они обеспечивают отдельные этапы формирования результатов мониторинга, включая подготовку информации, выделение и интерпретацию признаков, учет неопределенности и объединение свидетельств. При совместном использовании разнородной и неполной информации требуется согласованная организация этих процессов.

На основании проведенного анализа выявлена недостаточная представленность общих подходов к описанию информационных процессов, совместному распознаванию состояния подводной среды и автоматизированному формированию специализированных архитектур программно-аппаратных комплексов. Сформулирована актуальная научно-техническая задача и определены основные направления исследования: разработка модели описания информационных процессов, метода распознавания состояния подводной среды, обобщенной архитектуры и методики ее специализации.

Во **второй главе** разработаны модель описания информационных процессов цифровой технологии, метод распознавания состояния подводной среды, обобщенная архитектура программно-аппаратного комплекса

инфокоммуникационной системы экологического мониторинга подводной среды и методика формирования специализированной архитектуры.

Исходными данными являются решаемая задача и условия проведения мониторинга. Выделены три направления наблюдения: W - водная среда, B - гидробионты, S - подводная инфраструктура. Условия мониторинга определяются характеристиками акватории, доступностью средств наблюдения и связи, требованиями к периодичности и оперативности получения информации. Для конкретной задачи используется необходимое направление или их сочетание. Взаимосвязь исходных условий и направлений наблюдения представлена на рисунке 1.

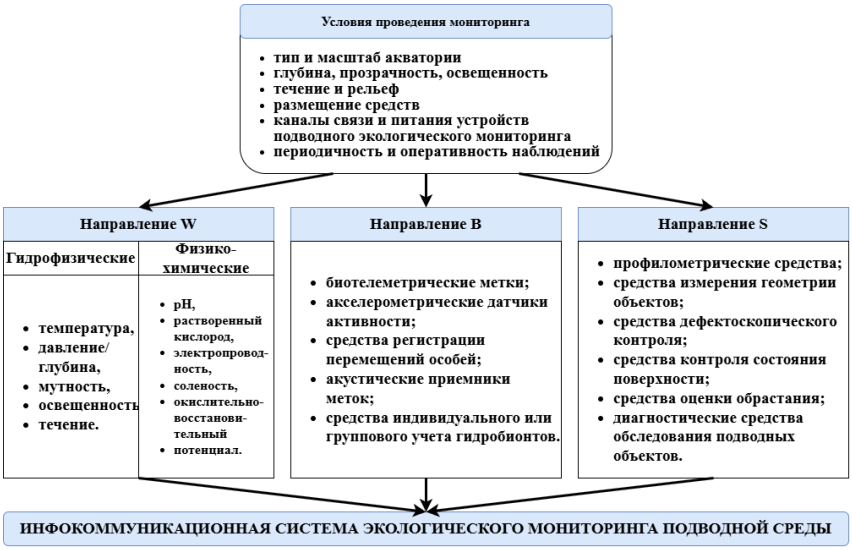


Рисунок 1 – Исходные условия разработки цифровой технологии

Модель описания информационных процессов

Разработана модель описания информационных процессов цифровой технологии, определяющая состав и структуру используемой и формируемой информации, ее источники, условия получения, координатно-временную привязку и связи между результатами последовательных информационных процессов.

Для единого представления разнородной информации введена типовая запись наблюдения, связывающая объект, наблюдаемый показатель, результат, время, пространственную привязку и источник информации:

$$O_i^u = (g_i^u, p_i^u, y_i^u, t_i^u, r_i^u, s_i^u), u \in \{W, B, S\}, \quad (1)$$

где g_i^u - объект наблюдения; p_i^u - наблюдаемый показатель; y_i^u - результат измерения или программной обработки; t_i^u - время получения результата; r_i^u - координатная или зональная привязка; s_i^u - идентификатор источника либо программного модуля.

Запись применяется к числовым измерениям, результатам обработки изображений, видеопоследовательностей, гидроакустической и телеметрической информации. Для производных показателей сохраняется связь с исходными наблюдениями, что обеспечивает прослеживаемость их формирования.

Координатно-временное согласование выполняется относительно расчетного интервала и контролируемой области. Для конфигурации,

использующей все три направления, набор информации текущей расчетной итерации определяется выражением:

$$N_k = \left(D_k^W,\, D_k^B,\, D_k^S\right) \qquad (2)$$

где D_k^W, D_k^B, D_k^S – согласованные наборы информации о водной среде, гидробионтах и подводной инфраструктуре на итерации k. Если задача охватывает только часть направлений, в набор включается соответствующая информация.

Отличительной особенностью модели является описание переходов информации между последовательными процессами цифровой технологии. Сформированный набор текущей итерации используется для определения контекста и фильтрации, допущенные наблюдения - для формирования и интерпретации признаков, результаты интерпретации - для получения свидетельств, а объединенные свидетельства - для оценивания и прогнозирования состояния.

При этом информация одного направления может влиять на интерпретацию другого. Например, мутность и освещенность воды учитываются при анализе визуальных наблюдений гидробионтов и подводной инфраструктуры, а скорость течения может учитываться при интерпретации характеристик перемещения гидробионтов. При таком взаимодействии сохраняется принадлежность результатов первоначальным направлениям наблюдения.

Обобщенное представление модели приведено на рисунке 2

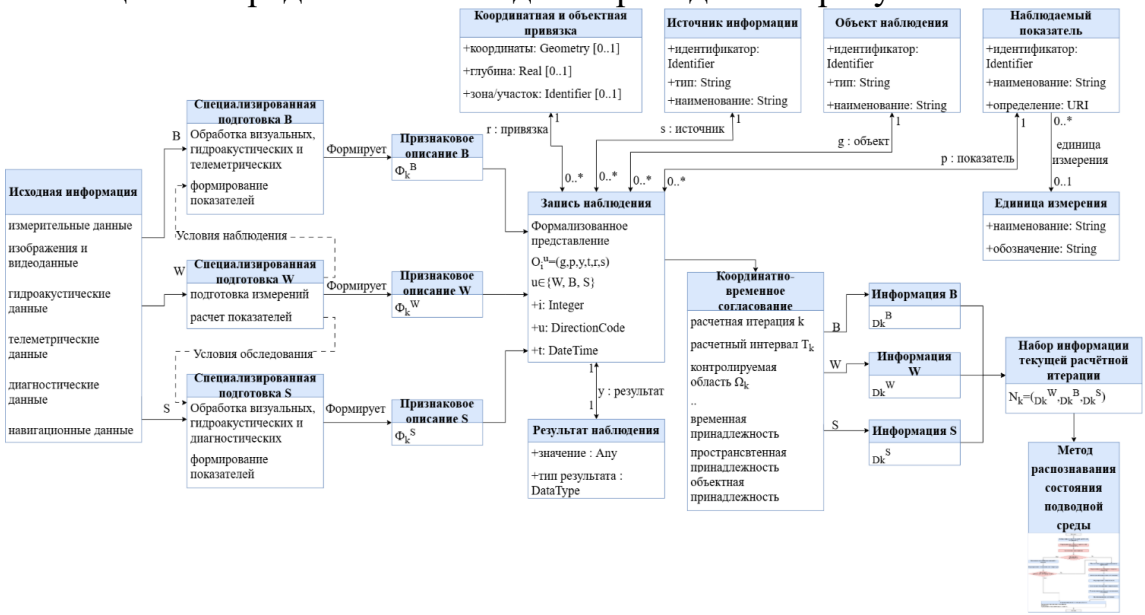


Рисунок 2 – Модель описания информационных процессов цифровой технологии

Метод распознавания состояния подводной среды

Разработан метод распознавания состояния подводной среды, обеспечивающий совместное использование разнородной и неполной информации с учетом условий ее получения. Метод предусматривает формирование контекста расчетной ситуации, адаптивную фильтрацию, подготовку и нейронечеткую интерпретацию признаков, формирование и байесовское объединение свидетельств, оценивание и краткосрочное прогнозирование состояния.

Контекст C_k включает характеристики условий наблюдения, влияющие на допустимость информации или интерпретацию признаков. На его основе применяются технические и контекстные правила фильтрации. Для каждой записи формируется признак допуска:

$$a_{i,k}^{u} = \begin{cases} 1, & \text{если запись может использоваться на итерации } k, \\ 0, & \text{если запись не используется на итерации } k. \end{cases} \quad (3)$$

где $a_{i,k}^{u}$=1 соответствует включению записи направления u в обработку на итерации k; $a_{i,k}^{u}$=0 - исключению с фиксацией причины.

Технически некорректные и недопустимые по условиям наблюдения записи исключаются из текущей интерпретации с сохранением причин исключения. При этом корректно зарегистрированные отклонения от характерных значений не удаляются, поскольку могут свидетельствовать об изменении состояния подводной среды.

После фильтрации информация преобразуется в признаки. Для числовых наблюдений используются измеренные и производные показатели, а для визуальных и гидроакустических данных могут применяться результаты нейросетевого обнаружения, классификации и сегментации. Интерпретация признаков осуществляется с помощью функций принадлежности лингвистическим категориям:

$$\mu_{j,l,k} = \mu_{j,l}(\delta_{j,k}), \mu_{j,l,k} \in [0,1], \quad (4)$$

где $\delta_{j,k}$ – нормированное отклонение признака, $\mu_{j,l,k}$ – степень принадлежности j-го признака l-й лингвистической категории на итерации k.

Результаты нечеткой интерпретации используются для формирования свидетельств о возможных состояниях. Правдоподобие свидетельства при гипотезе H_h определяется выражением:

$$P(E_{j,k} \mid H_h) = \sum_{l=1}^{L_j} \mu_{j,l,k}\ P(Z_{j,l} \mid H_h), \quad (5)$$

где $E_{j,k}$ – свидетельство по j-му признаку; $Z_{j,l}$ – l-я лингвистическая категория; L_j – число категорий; $P(Z_{j,l} \mid H_h)$ - условная вероятность категории при гипотезе H_h.

По совокупности доступных свидетельств вычисляются апостериорные вероятности гипотез состояния:

$$P(H_h \mid E_k) = \frac{P(E_k \mid H_h)P(H_h)}{\sum_{r=0}^{M} P\,(E_k \mid H_r)P(H_r)}. \quad (6)$$

Итоговое состояние определяется гипотезой с максимальной апостериорной вероятностью, а для краткосрочного прогнозирования используется динамика этих вероятностей. При временном отсутствии информации одного направления обработка продолжается по доступным свидетельствам других направлений.

Отличие разработанного метода заключается в согласованном применении контекстно-зависимой фильтрации, нейронечеткой интерпретации и байесовского объединения свидетельств. Это позволяет учитывать условия наблюдения при формировании оценки состояния, не смешивая технические ошибки регистрации

с содержательными изменениями наблюдаемых показателей. Последовательность метода представлена на рисунке 3.

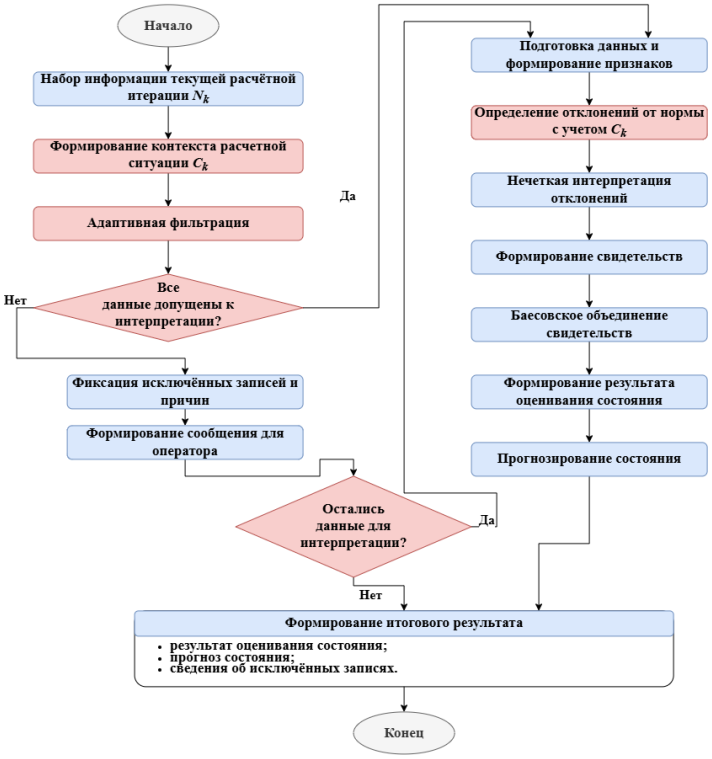


Рисунок 3 – Схема функционирования алгоритма реализации метода распознавания состояния подводной среды

Обобщенная архитектура программно-аппаратного комплекса.

Разработана обобщенная архитектура ПАК инфокоммуникационной системы экологического мониторинга подводной среды, предназначенная для формирования специализированных конфигураций при изменении задач и условий наблюдения. На основе анализа существующих решений выделены общие функциональные компоненты, специализированные модули и информационные связи между ними. Сформулированы семь принципов построения, шесть требований и шесть критериев оценки архитектуры.

Программная составляющая включает общие модули регистрации, технического контроля, координатно-временного согласования, формирования набора текущей расчетной итерации и хранения информации. Специализированные модули выбираются в зависимости от задачи мониторинга, а их обработка организована по форме представления информации, что позволяет повторно использовать модули обработки числовых рядов, изображений, видеопоследовательностей и гидроакустических данных для различных направлений наблюдения. Программные компоненты метода распознавания обеспечивают формирование результатов оценивания и прогнозирования состояния. Архитектура программной составляющей представлена на рисунке 4.

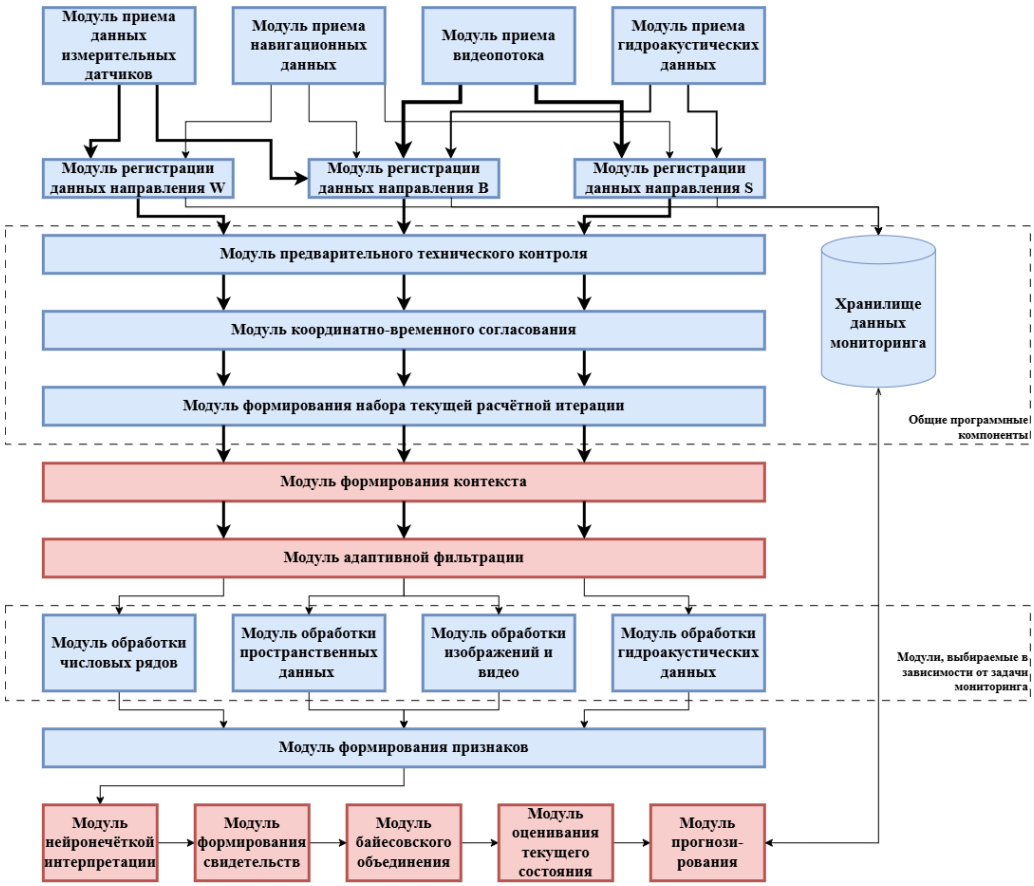


Рисунок 4 – Архитектура программной составляющей ПАК

Аппаратная составляющая объединяет стационарные и мобильные узлы наблюдения, локальные вычислительные средства, узлы связи и коммутации, информационно-вычислительный сервер, хранилище данных и автоматизированное рабочее место оператора. Конкретный состав средств наблюдения и размещение вычислительных функций определяются задачей мониторинга, ресурсными ограничениями и требованиями к информационному взаимодействию. Аппаратная архитектура представлена на рисунке 5.

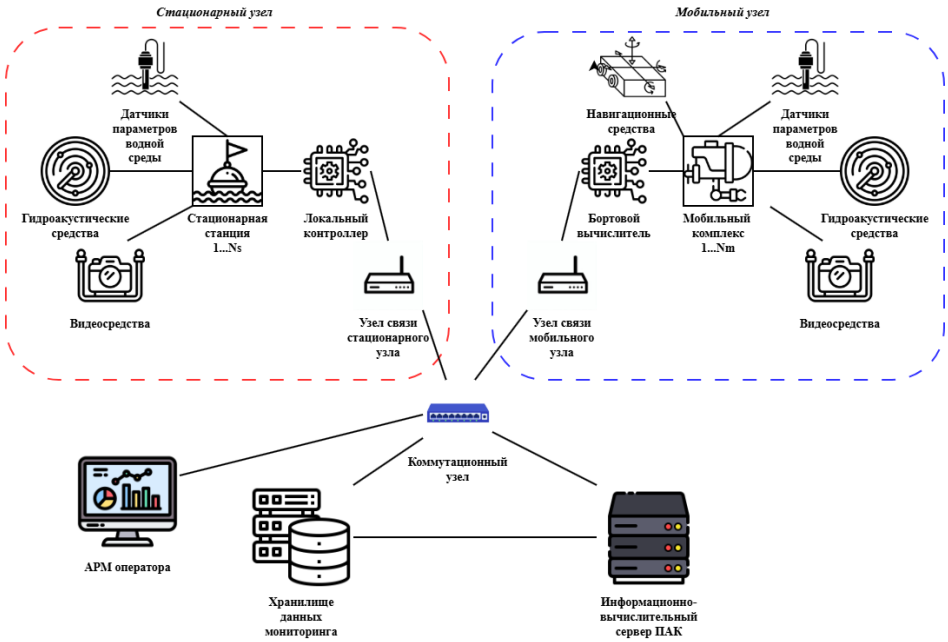


Рисунок 5 – Архитектура аппаратной составляющей ПАК

Для формирования ПАК под конкретную задачу разработана методика формирования специализированной архитектуры. Вариант архитектуры представляется совокупностью аппаратных компонентов, программных модулей и связей между ними:

$$A_j = (H_j, M_j, L_j) \quad (7)$$

где A_j – j-й вариант специализированной архитектуры; H_j – состав и количество аппаратных компонентов; M_j – набор программных модулей; L_j – связи между выбранными компонентами.

Методика включает пять этапов: уточнение задачи и условий мониторинга, выбор направлений наблюдения и необходимой информации, формирование аппаратной конфигурации, формирование программной конфигурации, проверку требований и оценку по критериям. При несоответствии установленным требованиям состав компонентов и связи корректируются с повторной проверкой. Из нескольких допустимых вариантов выбирается конфигурация с минимально необходимым составом программных и аппаратных компонентов.

Разработанная методика позволяет формировать специализированные архитектуры на основе общей архитектурной основы без повторного определения структуры взаимодействия всех компонентов и автоматизировать соответствующие операции проектирования. Алгоритм формирования специализированной архитектуры приведен на рисунке 6.

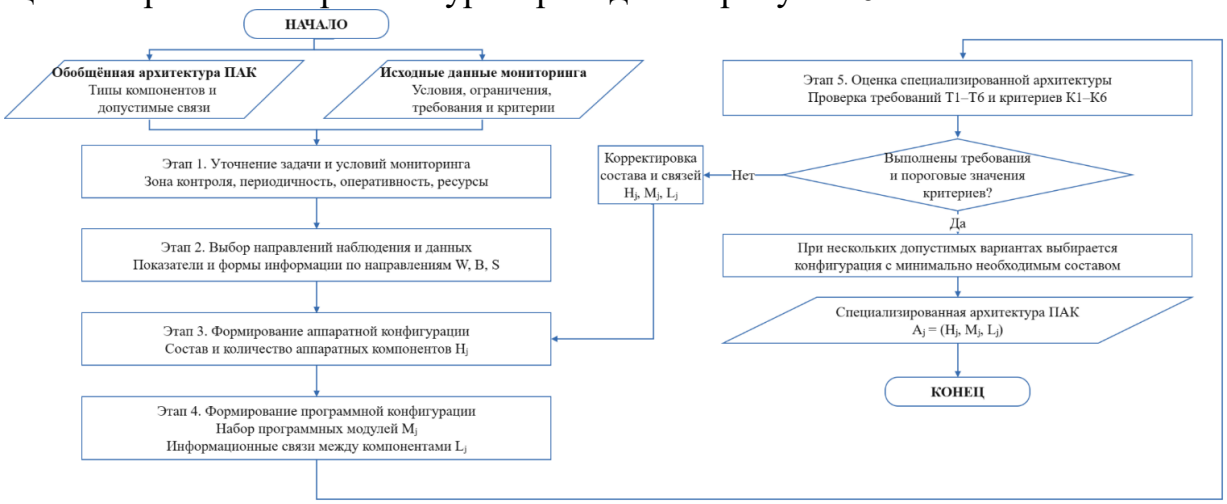


Рисунок 6 – Алгоритм формирования специализированной архитектуры программно-аппаратного комплекса

В **третьей главе** проведена вычислительная апробация разработанных модели описания информационных процессов цифровой технологии и метода распознавания состояния подводной среды на задаче совместного анализа температуры воды и двигательной активности гидробионтов.

Для выбранной задачи сформирована специализированная архитектура программно-аппаратного комплекса с двумя направлениями мониторинга: *W* - температура воды и *B* - двигательная активность гидробионтов, представленная показателем *VeDBA*. Архитектура включает средства получения и регистрации информации, узел связи, информационно-вычислительный сервер, хранилище данных и автоматизированное рабочее место оператора. В вычислительном

эксперименте физические средства наблюдения заменены сформированными временными рядами, а программная реализация выполнена в *MATLAB/Simulink*. Специализированная архитектура представлена на рисунке 7.

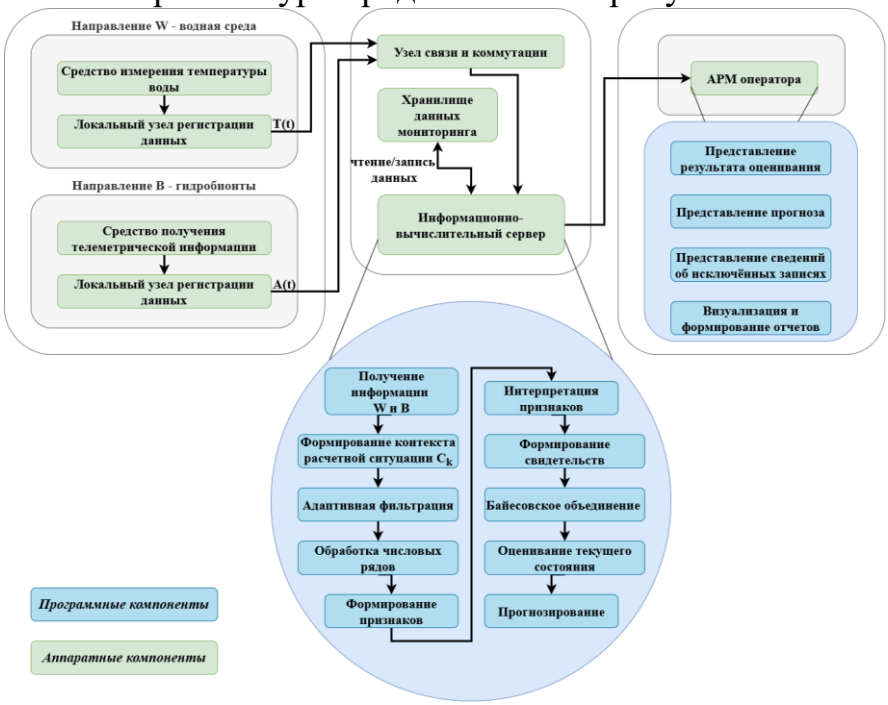


Рисунок 7 – Специализированная архитектура ПАК эксперимента

Модель описания информационных процессов конкретизирована для температурных и телеметрических наблюдений с сохранением временной привязки, принадлежности информации источникам и последовательности ее преобразования. Для каждого расчетного шага формируется согласованный набор информации двух направлений:

$$N_k = (D_k^W, D_k^B). \quad (8)$$

Для проведения эксперимента сформированы синтетические временные ряды на основе характеристик двух независимых эмпирических наборов наблюдений: температурных данных карпа и данных двигательной активности судака. Зависимость активности от температуры при генерации не задавалась, поэтому показатели рассматривались как независимые источники свидетельств.

Подготовлено 200 экспериментов продолжительностью 48 часов с шагом 10 минут, всего 57 600 расчетных шагов. Для каждого из четырех сценариев создано по 50 реализаций: без изменений, с изменением только температуры, только активности и с совместным изменением обоих показателей. Для проверки адаптивной фильтрации дополнительно сформированы 60 пропусков температуры, 49 технически некорректных температурных значений и 38 нештатных пропусков активности. Отсутствие активности ночью с 22:00 до 06:00 учитывалось как ожидаемое контекстное условие. Эталонная разметка хранилась отдельно и использовалась исключительно для проверки результатов.

Вычислительный стенд реализован в *MATLAB/Simulink* и воспроизводит последовательность процедур метода: формирование контекста, адаптивную фильтрацию, подготовку и нечеткую интерпретацию признаков, байесовское объединение свидетельств, оценивание и прогнозирование состояния. Подсистема

верификации отделена от вычислительных блоков метода. Структура стенда представлена на рисунке 8.

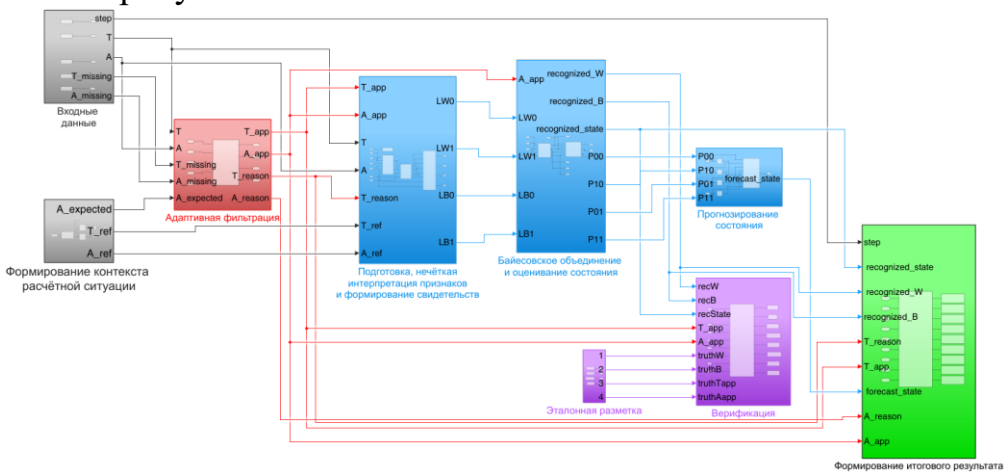


Рисунок 8 – Вычислительный стенд в *MATLAB/Simulink*

Для интерпретации используются суточные опорные профили температуры и активности. Температурный профиль корректируется по первым шести часам наблюдений текущего эксперимента, а профиль активности остается фиксированным для всех реализаций. Для четырех гипотез состояния приняты равные априорные вероятности 0,25. При исключении информации одного направления обработка другого продолжается, а совместное состояние определяется при наличии допустимой информации обоих направлений.

Характерный результат работы метода представлен на рисунке 9 для сценария совместного изменения температуры и двигательной активности. На графике показаны изменения обоих показателей, результаты их распознавания и сопоставление с эталонными состояниями. Метод выявляет изменение температуры и вложенное в него изменение активности, формируя соответствующие переходы между гипотезами. В представленном эксперименте также демонстрируется исключение отсутствующих температурных значений с последующим продолжением обработки.

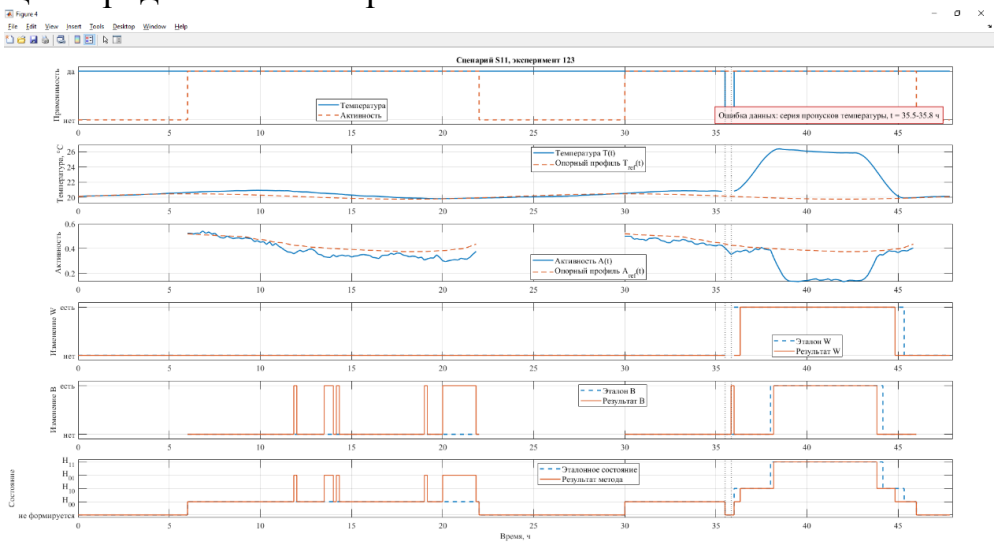


Рисунок 9 – Результаты вычислительного эксперимента для сценария совместного изменения температуры и двигательной активности

Сводные результаты оценивания и прогнозирования состояния по четырем сценариям представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сводные результаты вычислительного эксперимента

Сценарий	**Число экспериментов**	**Температура, %**	**Активность, %**	**Совместное состояние, %**	**Прогноз, %**
S00	50	100,00	85,98	85,99	79,63
S10	50	97,65	85,21	82,30	76,32
S01	50	99,91	84,20	84,06	78,25
S11	50	97,33	86,57	83,16	77,93
В среднем / всего	200	98,72	85,49	83,88	78,03

По результатам 200 экспериментов решения адаптивной фильтрации полностью совпали с эталонной разметкой, что соответствует точности 100 % для сформированного набора данных. Средняя точность распознавания изменений температуры составила 98,72 %, двигательной активности гидробионтов - 85,49 %, совместного состояния - 83,88 %. Более низкая точность распознавания активности связана с ее естественной изменчивостью относительно фиксированного суточного опорного профиля.

Краткосрочное прогнозирование выполнялось на горизонте 30 минут посредством линейной экстраполяции изменения апостериорных вероятностей гипотез. По результатам 36 969 допустимых сопоставлений средняя точность прогнозирования составила 78,03 %. Основные ошибки возникали вблизи переходов между состояниями и при кратковременных колебаниях двигательной активности.

Полученные результаты подтвердили работоспособность разработанного метода при совместном использовании разнородной информации, наличии некорректных и отсутствующих наблюдений. Достигнутые показатели оценивания и прогнозирования свидетельствуют о возможности автоматизированного распознавания изменений состояния подводной среды в условиях проведенного синтетического вычислительного эксперимента.

В **четвертой главе** проведена прикладная апробация разработанных решений цифровой технологии на задачах мониторинга водной среды, гидробионтов и подводной инфраструктуры, а также выполнена оценка повышения эффективности проектирования и функционирования инфокоммуникационной системы экологического мониторинга подводной среды.

Для практического применения методики формирования специализированной архитектуры разработана ее программная реализация. Пользователь задает характеристики акватории, требуемый пространственный охват, периодичность наблюдений, допустимое время получения результата, состав контролируемых показателей и необходимые функции системы. На основе справочников компонентов и базы правил автоматически определяются рекомендуемый тип организации наблюдений, состав аппаратных и программных компонентов и связи между ними. Формируются схемы специализированной архитектуры и информационных процессов, выполняется проверка соответствия

установленным требованиям и критериям. Предусмотрено формирование альтернативных вариантов архитектуры.

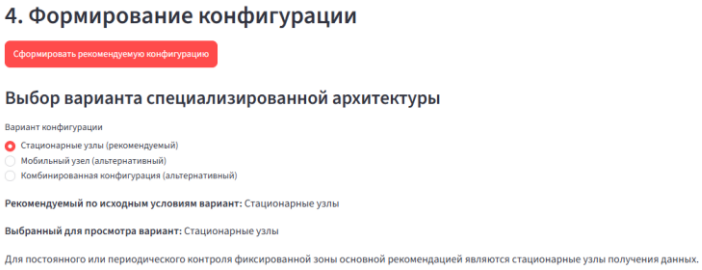


Рисунок 10 – Программная реализация методики формирования специализированной архитектуры

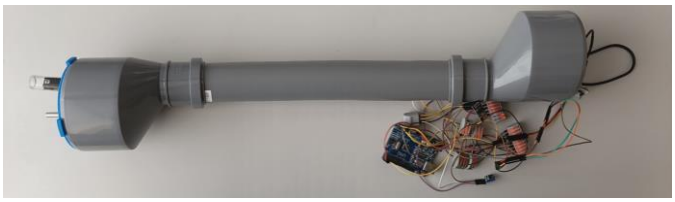
Прикладная апробация проведена для четырех задач, различающихся объектами наблюдения, исходной информацией и формируемыми результатами.

При контроле параметров водной среды сформирована специализированная архитектура с датчиками температуры, водородного показателя, растворенного кислорода, электропроводности, мутности и давления. Разработан измерительный узел на базе *Arduino Mega* 2560 с передачей информации по *Wi-Fi*. Регистрация и визуализация результатов выполнялись средствами *ThingsBoard*, контроль условий и формирование уведомлений - средствами *Zabbix*. Реализованы представление временной динамики параметров и пространственная визуализация наблюдений.

Для определения характеристик гидробионтов использованы нейросетевое обнаружение и сегментация рыб, построение центральной линии тела для измерения размеров, а также сопровождение особей между кадрами с определением траекторий, скорости и двигательной активности. Для сегментации применялась модель семейства *YOLO*, для анализа движения - *YOLOv9* и *StrongSORT*. Результатами являются численность, размерные, пространственные и двигательные характеристики гидробионтов.

В задаче выделения и подсчета икры использован тот же общий тракт получения, регистрации и обработки визуальной информации, но специализированный модуль заменен на модифицированную модель *YOLOv5* для обнаружения малоразмерных объектов при их плотном расположении. Формировались количество объектов, их ориентировочные размеры и характеристики расположения. Это продемонстрировало возможность повторного использования архитектурных компонентов при изменении объекта наблюдения.

Для контроля подводной инфраструктуры выполнена апробация на задаче обследования трубопровода по видеоданным. Сегментация объекта осуществлялась с использованием *YOLOv9* на вычислительном модуле *Jetson Nano*. По полученной маске методом главных компонент определялась ориентация трубопровода, после чего формировалась его центральная линия. Полученные геометрические характеристики представлялись в соответствии с моделью описания информационных процессов.



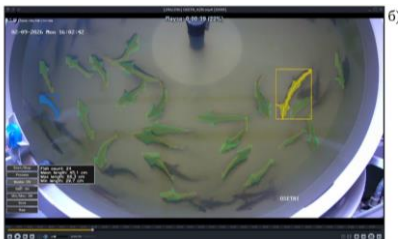
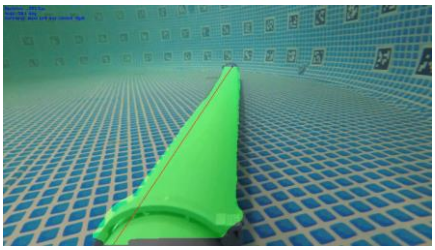



Рисунок 11 – Примеры прикладной апробации разработанных решений

Проведенная апробация показала возможность применения общей архитектурной основы к задачам, использующим числовые измерения, изображения и видеопоследовательности. При переходе между задачами сохраняются общие функции получения, регистрации, передачи, хранения и представления информации, а специализированные программные модули и состав технических средств определяются объектом и условиями наблюдения.

Повышение эффективности проектирования достигается за счет повторного использования обобщенной архитектуры и автоматизации отдельных операций формирования специализированного программно-аппаратного комплекса. В соответствии с ГОСТ Р 59793-2021 разработанные решения применимы прежде всего при формировании вариантов концепции автоматизированной системы и предварительных проектных решений. Программная реализация методики автоматизирует выбор компонентов, определение связей между ними, построение схем и проверку сформированной архитектуры.

Для трех основных направлений мониторинга измерено время автоматизированного формирования специализированных архитектур. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты автоматизированного формирования специализированной архитектуры для прикладных задач

Прикладная задача	**Формируемый результат**	**Время, с**
Контроль параметров водной среды	Физико-химические показатели воды	38
Определение характеристик гидробионтов	Численность, размеры, положение и двигательная активность	36
Контроль подводной инфраструктуры	Положение, ориентация и геометрия трубопровода	50

Полученные результаты показали, что автоматизированное формирование специализированной архитектуры для рассмотренных задач выполняется за 36–50 с. Таким образом, применение разработанной методики и ее программной реализации обеспечивает повышение эффективности проектирования за счет

автоматизации повторяемых проектных операций при сохранении общей архитектурной основы.

Повышение эффективности функционирования рассматривается в части расширения функциональной полноты, поддерживаемых направлений наблюдения и возможностей совместного использования разнородной информации. Для оценки выполнено сопоставление разработанных решений с 23 отечественными и зарубежными решениями по 17 признакам, характеризующим направления мониторинга, архитектурные свойства, информационные и аналитические возможности.

Сопоставление показало, что разработанная цифровая технология охватывает все 17 рассматриваемых признаков, включая поддержку трех направлений мониторинга, формирование специализированных архитектур, единое представление информации, координатно-временную привязку, адаптивную фильтрацию с учетом условий наблюдения, нейронечеткую интерпретацию, байесовское объединение свидетельств, оценивание и прогнозирование состояния. В рассмотренных аналогах эти возможности представлены преимущественно в отдельных сочетаниях.

В **заключении** обобщены основные результаты диссертационного исследования, подтверждена работоспособность разработанных решений и представлены выводы о повышении эффективности проектирования и функционирования инфокоммуникационной системы экологического мониторинга подводной среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача разработки информационного обеспечения цифровой технологии инфокоммуникационной системы экологического мониторинга подводной среды. Для ее решения разработаны взаимосвязанные модель описания информационных процессов, метод распознавания состояния и архитектурные решения, обеспечивающие согласованное представление и совместное использование разнородной информации, формирование результатов оценивания и прогнозирования, а также построение специализированных программно-аппаратных комплексов для конкретных задач и условий мониторинга.

В ходе диссертационного исследования получены следующие основные научные и практические результаты:

1) Проведен анализ существующих инфокоммуникационных систем экологического мониторинга подводной среды и методов обработки и интерпретации информации. Выявлены ограничения, связанные со специализацией технических решений, разнородностью наблюдений и недостаточной представленностью общих подходов к формированию архитектур для различных задач мониторинга.

2) Разработана модель описания информационных процессов цифровой технологии, обеспечивающая единое представление разнородной информации, ее источников, условий получения, координатно-временной привязки и связей между последовательными информационными процессами. Модель позволяет

прослеживать формирование результатов оценивания и прогнозирования от исходных наблюдений.

3) Разработан метод распознавания состояния подводной среды, объединяющий адаптивную фильтрацию с учетом условий наблюдения, нейронечеткую интерпретацию признаков и байесовское объединение свидетельств. Метод обеспечивает оценивание и краткосрочное прогнозирование состояния при разнородности и неполноте информации.

4) Разработаны обобщенная архитектура программно-аппаратного комплекса и методика формирования специализированной архитектуры. Выделены общие и специализированные компоненты, предусмотрены выбор программных и аппаратных средств, установление связей между ними и проверка сформированных вариантов по требованиям и критериям.

5) Проведены вычислительный эксперимент и прикладная апробация разработанных решений. По результатам 200 экспериментов точность распознавания совместного состояния составила 83,88 %, прогнозирования на горизонте 30 минут - 78,03 %. Продемонстрирована применимость решений к мониторингу водной среды, гидробионтов и подводной инфраструктуры. Автоматизированное формирование специализированных архитектур выполнялось за время от 36 до 50 с.

Повышение эффективности проектирования подтверждается автоматизированным формированием специализированных архитектур для различных задач мониторинга, а повышение эффективности функционирования характеризуется расширением поддерживаемых задач и информационных возможностей в рамках единой архитектурной и методической основы. Прикладная апробация продемонстрировала повторное использование компонентов при изменении объектов наблюдения, а работоспособность процедур совместного оценивания и прогнозирования состояния подтверждена вычислительным экспериментом.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях ВАК по специальности 2.3.8:

1. Подвесовский А.Г., Филонов А.А., Захарова А.А., **Тевяшов Г.К.**, Романова М.А. Представление и обработка нечеткой информации о предпочтениях в задачах реконфигурации гетерогенной группы объектов киберфизической системы // Управление большими системами: сборник трудов. 2026. Вып. 120. С. 206-227.
2. В ПЕЧАТИ ЛИЧНЫЙ
3. В ПЕЧАТИ с руководителем
4. Мещеряков Р.В., Захарова А.А., Хрипунов С.П., Романова М.А., **Тевяшов Г.К.**, Кутахов В.П., Настас Г.Н. Подход к формированию информационно-моделирующего комплекса управления парком БЛА // Управление большими системами: сборник трудов. 2026. Вып. 124. С. 206-227.

В изданиях Wos/Scopus:

5. Мещеряков Р.В., Русаков К.Д., **Тевяшов Г.К.**, Приходько Н.А. Deep Learning-Based Sturgeon Counting and Length Estimation Using Segmentation and Skeletonization / Proceedings of the 6th International Conference on Agriculture

Digitalization and Organic Production (ADOP 2026). Калининград: Springer, 2027. Т. 1. С. 427-438.

6. Мещеряков Р.В., Русаков К.Д., **Тевяшов Г.К**. Determining Average Size and Average Speed of Fish Using Deep Learning Technologies / Proceeding of the 5th International Conference on Agriculture Digitalization and Organic Production (ADOP 2025). Barnaul: Springer, 2026. С. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-032-17407-9_1.

7. Мещеряков Р.В., Русаков К.Д., **Тевяшов Г.К.** Automatic Determination of Sturgeon Size Using Deep Learning Technologies / Agriculture Digitalization and Organic Production. Минск: Springer, 2024. С. 195-206.

8. Мещеряков Р.В., Русаков К.Д., **Тевяшов Г.К.,** Мышкин А.В. Detection and Characterization of Caviar Using a Neural Network Algorithm / Agriculture Digitalization and Organic Production. St Petersburg, RUSSIA: Springer, 2023. С. 383–395.

9. **Тевяшов Г.К.** Neural Network Analysis of Underwater Pipelines and Trajectory Construction for Navigation / Proceedings of 9th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT 2025). Gomel: IEEE, 2025. С. https://ieeexplore.ieee.org/document/11427747.

<u>В сборниках, трудах конференций, индексируемых РИНЦ:</u>

10. **Тевяшов Г.К.**, Пащенко Р.А., Баранова Ю.А. Разработка системы мониторинга параметров воды для аквакультуры // Датчики и системы. 2024. № 2. С. 33-39.

11. **Тевяшов Г.К.** Байесовско-нейронная модель комплексного контроля водной среды / Труды 21-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2025, Тамбов). Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2025. Т. 2. С. 168-175.

12. **Тевяшов Г.К.** Киберфизические системы в аквакультуре / Материалы 4-й Международной научно-практическая конференции «ЦИФРОВИЗАЦИЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА» (Тамбов, 2024). Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2024. Т. 2. С. 123-126.

13. **Тевяшов Г.К.** Управление подводным аппаратом для экологического мониторинга на основе нечеткой логики / Труды 20-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2024, Новочеркасск). Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2024. Т. 2. С. 78-82.

14. **Тевяшов Г.К.** Цифровизация рыбных производств путем внедрения киберфизических систем / Материалы 7-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Программная инженерия: современные тенденции развития и применения (ПИ-2023)». Курск: ЗАО «Университетская книга», 2023. №1. С. 215-218.

<u>Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:</u>

15. **Г.К. Тевяшов**. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026661602 «Программа для автоматизированного измерения длины осетровых в бассейне по видеозаписи с построением средней линии объекта» Дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 22.04.2026.

16. К.Д. Русаков, **Г.К. Тевяшов.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023686143 «Программа для наблюдения, захвата рабочей сцены и детектирования малоразмерных объектов в их тесном скоплении» Дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 04.12.2023.