

# Автоматизация радиационно-химического контроля жидких радиоактивных отходов и сред

А. П. Полянский, М. Г. Жабицкий

**Аннотация**— Объекты использования атомной энергии требуют непрерывного и точного радиационно-химического контроля жидких радиоактивных отходов и жидких радиоактивных сред (ЖРО и ЖРС). Классические лабораторные методы проверки позволяют с высокой точностью определить параметры исследуемой среды, но они требуют значительных временных задержек, связанных с отбором, подготовкой проб и последующими измерениями. Это создаёт информационный разрыв между фактическим и измеряемым состояниями среды. Кроме того, многие химические и фазово-дисперсные параметры претерпевают изменения, связанные с окислением и выпадением осадка.

В этой работе представлен подход к построению систематического автоматизированного радиационно-химического контроля жидких радиоактивных отходов и сред. Он включает регулярный потоковый сбор первичных данных, их передачу, долговременное хранение и потенциальную возможность обработки и анализа для оперативного реагирования в ходе эксплуатации и систематической постобработки. Предлагаемая в работе система предназначена для диагностического анализа среды, она не управляет технологическими процессами. Основное внимание уделяется архитектуре данных, обеспечивающей изолированность модулей сбора, передачи и хранения информации, а также соответствие требованиям информационной и функциональной безопасности.

Предложенная концепция позволит использовать накопленные исторические данные измерений в существующих и проектируемых системах управления и анализа. Результаты работы могут использоваться при создании и улучшении текущих систем радиационного контроля на объектах использования атомной энергии.

**Ключевые слова**—архитектура данных, ЖРО, радиационно-химический контроль, спектрометрия, АХК, архитектура информационных систем

## I. ВВЕДЕНИЕ

Современные объекты использования атомной энергии характеризуются высокой сложностью технологических процессов, многофакторным воздействием на материалы и среды, а также жесткими требованиями к радиационной и экологической безопасности.

В этих условиях радиационно-химический контроль жидких радиоактивных отходов и сред (ЖРО и ЖРС) должен обеспечить безопасность эксплуатации и обращения с радиоактивными средами [1].

Эффективность контроля определяется не только точностью отдельных измерений, но и возможностью системного накопления, хранения и последующего анализа данных, отражающих динамику состояния контролируемых сред [2]-[4].

На многих объектах значительная часть радиационно-химических измерений выполняется лабораторными методами, включающими отбор проб, транспортировку, пробоподготовку и инструментальный анализ по регламентированным методикам [5], [6]. Такая схема обеспечивает достаточную точность и метрологическую обоснованность результатов. Однако формируется временной разрыв между моментом формирования пробы и получением результата. На практике задержка по ключевым параметрам может достигать нескольких суток, что приводит к «информационному разрыву» при диагностике текущего состояния радиационно-химических сред и ограничивает возможности оперативного анализа и диагностики функционирования систем обращения с ЖРО/ЖРС. Это, естественно, исключает возможность оперативной диагностики отклонений и реагирования на эти отклонения через настройку режимов функционирования оборудования.

Переход к более регулярному (квазинепрерывному) съему первичных измерительных данных и их накопления в виде целостных цифровых массивов является частью тенденции цифровой трансформации промышленности и внедрения информационно-измерительных систем нового поколения [7], [8]. В промышленных задачах такие подходы обычно связывают с концепциями IoT/CPS и многоуровневыми архитектурами, в которых слой сенсоров, коммуникационные механизмы и аналитические сервисы образуют единый контур данных [2]-[4], [9]. При этом перенос «классических» IoT-подходов в атомную отрасль требует принципиальной адаптации: приоритетом становятся информационная безопасность, изолированность компонентов сбора, передачи и хранения первичных данных о состоянии среды, трассируемость, целостность, регулярность и системность данных, а не прямое управление технологическим процессом и не минимизация задержек [10], [11].

*А. Роль радиационно-химического контроля в системах обращения с ЖРО и ЖРС*

Радиационно-химический контроль ЖРО и ЖРС предназначен для получения достоверной информации о радиационных параметрах, радионуклидном,

химическом и фазово-дисперсном составе и иных физико-химических параметрах жидких сред, образующихся в процессе эксплуатации объектов использования атомной энергии [1], [5]. Эти данные необходимы для корректной классификации отходов, выбора методов переработки и кондиционирования, а также для документируемого подтверждения соответствия нормативам [6]. Важно подчеркнуть диагностический характер контроля: система фиксирует состояние среды и формирует информационную основу без прямого воздействия на технологический процесс. Решения об управляющих воздействиях принимаются на другом уровне, но с учетом предоставляемой системой своевременной объективной информации. [1].

### С. Необходимость системного онлайн-контроля на объектах использования атомной энергии

Переход от разрозненных измерений к системному (квазинепрерывному) сбору данных обусловлен потребностью регулярно получать информацию непосредственно из контуров обращения с ЖРО/ЖРС и накапливать исторические массивы данных для последующего анализа и использования в существующих и проектируемых системах управления и анализа [3], [4]. При этом «онлайн-контроль» на объектах использования атомной энергии не следует трактовать как аналог систем управления промышленным оборудованием: по требованиям безопасности приоритетом становятся надежное

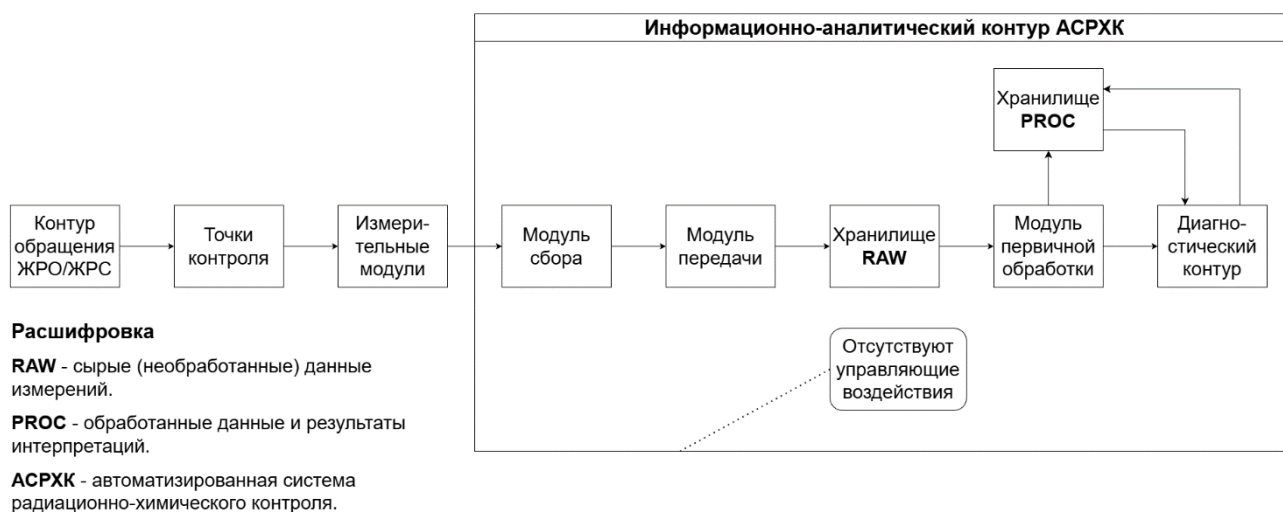


Рис. 1. Включение автоматизированной системы радиационно-химического контроля в контур обращения с ЖРО и ЖРС.

Место автоматизированной системы радиационно-химического контроля в общем контуре обращения с ЖРО и ЖРС показано на рисунке 1. Система формирует самостоятельный информационно-аналитический контур, связанный с технологической системой через точки контроля и измерительные модули, но не включённый в контур управления.

### В. Ограничения лабораторных методов и временной разрыв получения данных

Лабораторные методы (радиометрия/спектрометрия и химический анализ) обеспечивают высокую точность, но требуют процедур пробоотбора, пробоподготовки и измерений, регламентированных стандартными методиками [5], [6], [12]. В результате теряются промежуточные состояния среды, затрудняется выявление кратковременных изменений, а также снижается возможность сопоставления параметров во времени. Лабораторный подход плохо совместим с формированием плотных временных рядов, необходимых для статистического анализа, поиска корреляций и выявления трендов [13].

накопление, контролируемая доставка и трассируемость данных, а не минимальная задержка [10], [11].

### Д. Место автоматизированной системы контроля в контуре обращения с ЖРО

Автоматизированная система радиационно-химического контроля занимает промежуточное положение между первичными измерительными узлами и аналитическими контурами, использующими накопленные данные. Система интегрирует разнородные источники информации (радиометрические детекторы, спектрометрические модули, химические измерительные каналы, проточные модули) в единый цифровой контур [2], [9]. При этом система контроля не формирует управляющих сигналов; ее функция заключается в фиксации данных, их структурировании, передаче, долговременном хранении и обеспечении условий для вторичной обработки и анализа временных рядов [12], [13].

### Е. Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка и обоснование архитектуры автоматизированной системы радиационно-химического контроля ЖРО и ЖРС,

ориентированной на системный сбор, накопление и анализ контролируемых данных в условиях эксплуатации объектов атомной энергетики.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. анализ роли радиационно-химического контроля в системе обращения с ЖРО и ЖРС;
2. выявление ограничений традиционных лабораторных методов контроля;
3. формирование требований к архитектуре автоматизированной системы контроля с учетом условий эксплуатации объектов использования атомной энергии и требований к защищенности;
4. разработка архитектуры системы, обоснование модульной и послойной структуры системы сбора, передачи, хранения и вторичной обработки данных;
5. концептуальное проектирование методов расчетного анализа в общем контуре мониторинга параметров ЖРО и ЖРС.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОГРАНИЧЕНИЯ

Радиационно-химический контроль жидких радиоактивных сред в условиях эксплуатации объектов атомной энергетики представляет собой междисциплинарную задачу на стыке радиохимии, радиометрии, первичной измерительной техники и информационных технологий [1], [5]. В отличие от задач автоматизации технологических процессов, где ключевыми являются управление и поддержание режимов, в контуре радиационно-химического контроля приоритетом выступают достоверность, трассируемость, регулярность и системность данных при наличии жестких эксплуатационных и регламентных ограничений [1]. Поэтому постановка задачи требует явного разграничения функций контроля и управления, а также фиксации ограничений, влияющих на архитектуру системы и выбор аппаратно-программных решений [10], [11].

### A. Объект контроля системы: жидкие радиоактивные среды и отходы

Объектом контроля для разрабатываемой системы являются жидкие радиоактивные среды и отходы (трапные воды, регенерационные растворы, воды спецпрачечных, дезактивационные растворы, кубовые остатки и др.), образующиеся при эксплуатации объектов использования атомной энергии [1]. Характерные особенности – гетерогенность и изменчивость во времени, наличие растворенных и дисперсных форм загрязняющих компонентов. При лабораторном подходе, предполагающем пробоотбор и последующую транспортировку, химический состав исследуемой жидкости может изменяться до момента анализа, в том числе за счёт окислительных процессов, выпадения осадка и перераспределения компонентов между фазами. Радионуклиды находятся в различных физико-химических формах, а радиометрические характеристики часто представлены интегральными

величинами или спектрами, требующими интерпретации [5], [12], [14]. Химическое состояние описывается совокупностью показателей по стандартным методикам водного анализа [6]. Эти свойства определяют необходимость регулярного контроля с анализом накопленных данных, а не только получения единичных результатов отдельных проб [13].

### B. Предмет исследования

Предметом исследования является архитектура автоматизированной системы радиационно-химического контроля, обеспечивающая полный жизненный цикл работы с измерительной информацией: генерацию первичных данных средствами первичной измерительной техники, их структуризацию, передачу, долговременное хранение и последующую вторичную обработку [2], [3]. Рассматриваются:

1. архитектура генерации и сбора данных (измерительные модули, первичная структуризация данных);
2. архитектура передачи и хранения данных (формирование исторических массивов измерений, спектров, сопутствующих метаданных и их логическая структуризация);
3. архитектура вторичной обработки (спектрометрическая обработка радиометрических данных; статистический анализ динамики химических показателей; анализ фазово-дисперсного состава).

Задачи управления технологическими процессами сознательно не рассматриваются.

### C. Ключевые ограничения системы

Система должна соответствовать требованиям радиационной безопасности и эксплуатационным ограничениям: ограниченный доступ к оборудованию, невозможность частого обслуживания измерительных модулей, необходимость устойчивой работы в условиях ионизирующего излучения и агрессивных химических сред [1], [5].

Требования к задержке передачи данных являются мягкими и не предполагают реализации режимов жёсткого реального времени. Для контроля принципиальны целостность, регулярность и системность массивов измерений; «жёсткое реальное время» может противоречить требованиям защищенности и документируемости [10], [11].

Ключевым является анализ по историческим данным. Существенная часть параметров (включая спектры) требует сопоставления во времени и статистической интерпретации на длительных интервалах [12], [13].

Полностью отсутствуют функции управления: система не формирует управляющих воздействий и не участвует в контуре автоматического регулирования [1].

### D. Отличие системы контроля от систем управления и ИТ-платформ

Система контроля ориентирована на получение, накопление и анализ информации о состоянии объекта без прямого вмешательства в его работу [1]. Несмотря на использование отдельных концепций ИТ/ИИТ

(распределенные модули, цифровые интерфейсы, обмен данными), система функционирует в регламентированной инфраструктуре объектов использования атомной энергии и не предполагает открытых сетевых взаимодействий и адаптивного управления [4], [9]. Архитектурные решения подчинены требованиям надежности, изоляции и целостности, что согласуется с общей проблематикой защищенности IoT-инфраструктур [11].

#### Е. Научная и прикладная направленность

С научной точки зрения работа направлена на детализацию и проработку архитектурных принципов построения автоматизированных систем радиационно-химического контроля, учитывающих специфику измеряемых сред и необходимость вторичной обработки [5], [12], [14], [13]. С прикладной точки зрения результаты могут быть использованы при проектировании и модернизации систем контроля ЖРО/ЖРС и развитии аналитических инструментов диагностики на основе накопленных данных [1], [6].

распределенных информационно-измерительных систем [2], [3], но на объектах использования атомной энергии реализуется с приоритетом изоляции, трассируемости и защищенности [4], [11].

#### А. Модульная архитектура системы

В основе проектируемой системы лежит модульная архитектура, в которой функциональные элементы разделены в соответствии с их ролью в жизненном цикле измерительной информации [9]. Описанная модульная архитектура представлена на рисунке 2.

Разделение повышает модульность, упрощает сопровождение и локализует возможные источники искажений [3], [13].

#### В. Назначение и функции модулей

Модуль сбора данных взаимодействует с контролируемой средой и формирует первичные данные: радиометрические спектры, значения химических параметров, данные о фазово-дисперсном

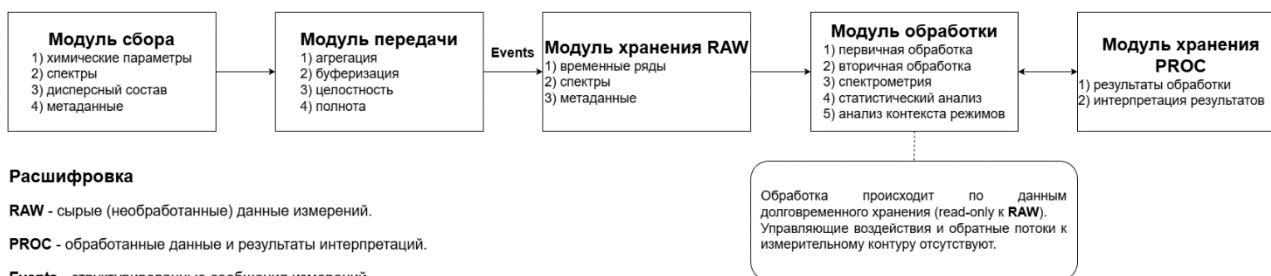


Рис. 2. Модульная архитектура автоматизированной системы радиационно-химического контроля.

### III. АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ РАДИАЦИОННО-ХИМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Архитектура автоматизированной системы радиационно-химического контроля определяется спецификой измеряемых сред, требованиями радиационной безопасности и необходимостью долговременного накопления данных [1], [5]. В отличие от систем управления, архитектура ориентирована на надежный и воспроизводимый жизненный цикл работы с измерительной информацией: измерение – доставка – хранение – первичная и вторичная обработка – аналитическая интерпретация [1].

В рамках настоящей работы под событием понимается структурированная запись потока данных, формируемая первичной измерительной техникой и включающая: значения измеряемых параметров (радиометрические данные/спектры, химические параметры, характеристики фазово-дисперсного состава при наличии), временную метку, идентификатор измерительного модуля (и/или канала), а также метаданные условий измерения (конфигурация, калибровка, флаги качества). Событие является минимальной единицей передачи и хранения, предназначенной для последующей обработки и интерпретации.

Такой подход согласуется с принципами

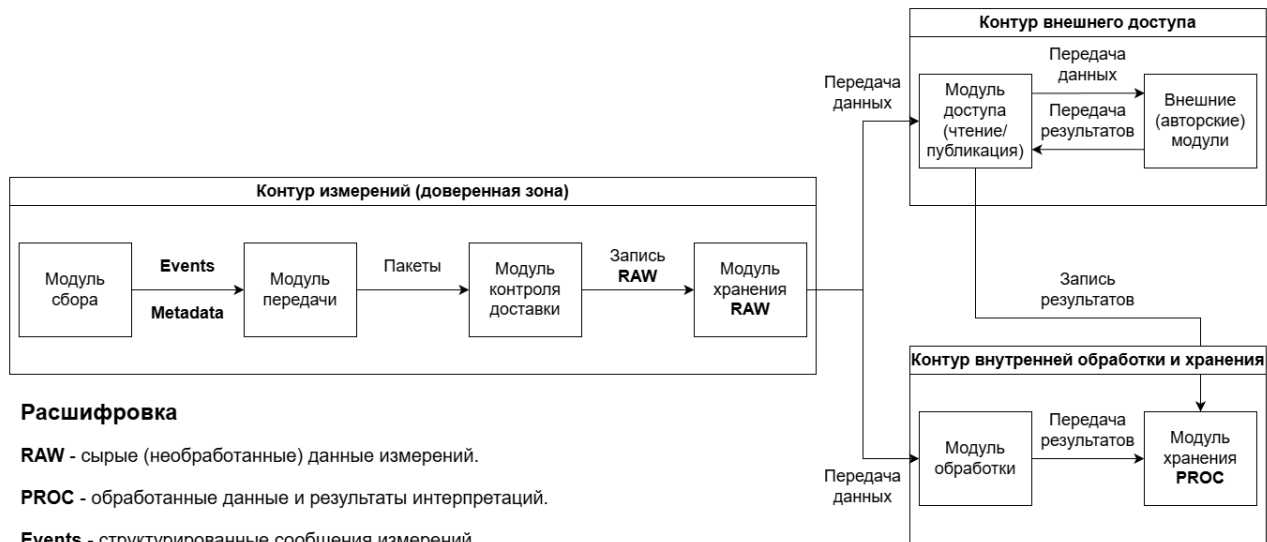
составе (в частности, распределение частиц по размерам), временные метки и метаданные условий измерения [5], [6], [12]. Он не интерпретирует данные и не принимает решений, что обеспечивает независимость процесса измерения от алгоритмов анализа.

Модуль передачи данных обеспечивает агрегацию, буферизацию и контроль целостности при доставке [15], [16]. Приоритет – устойчивость к сбоям и воспроизводимая доставка; минимизация задержек не является целевой [11].

Модуль хранения данных реализует долговременное накопление временных рядов химических параметров, спектров, фазово-дисперсного состава среды. Он логически разделяется на два компонента:

- (1) модуль хранения сырых (необработанных) данных, обеспечивающий сохранение оригиналов измерений, используемых для анализа и расчетов;
- (2) модуль хранения обработанных данных, формируемых после первичной и вторичной обработок.

Модуль вторичной обработки выполняет расчет радиометрических характеристик, обработку спектров, анализ динамики химических показателей и выявление закономерностей по историческим данным [12], [14]. Он работает с данными из хранилища, что обеспечивает их сохранность и изолированность от внешнего воздействия.



**Расшифровка**

**RAW** - сырые (необработанные) данные измерений.

**PROC** - обработанные данные и результаты интерпретаций.

**Events** - структурированные сообщения измерений.

**Metadata** - временные метки, параметры конфигурации, идентификаторы контроля целостности.

Рис. 3. Жизненный цикл данных в системе.

**С. Поток данных и отсутствие обратных связей**

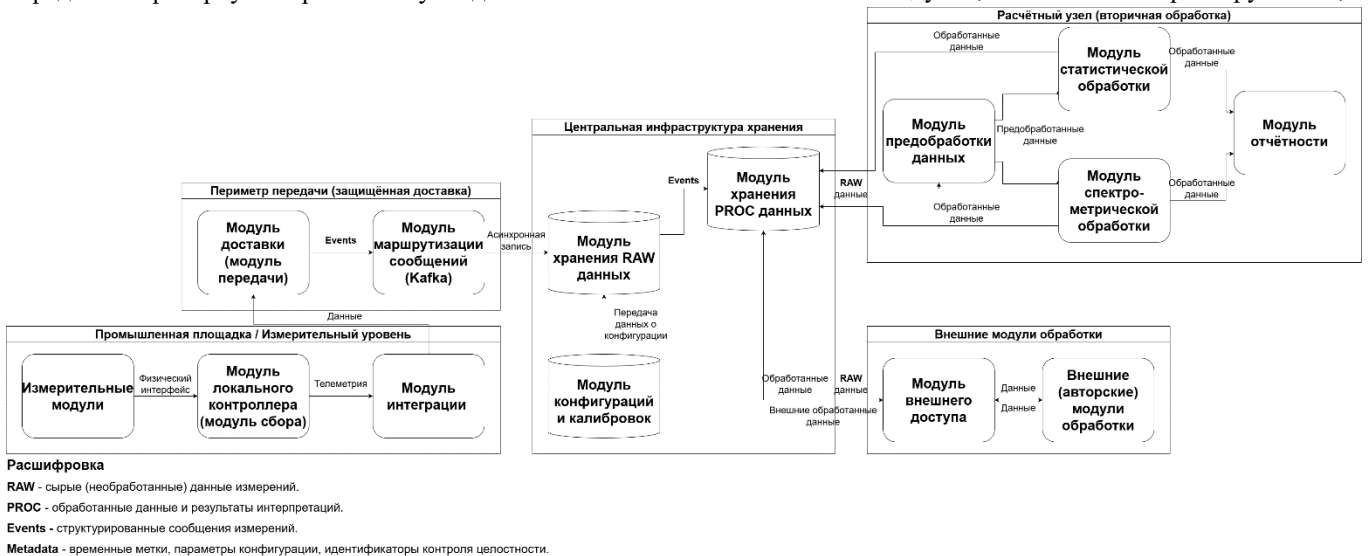
Потоки данных однонаправлены: от модуля сбора через модуль передачи к модулю хранения и далее к модулю вторичной обработки. Поток от хранения к обработке асинхронен и инициируется задачами анализа, что позволяет использовать произвольную глубину по времени. Для обеспечения полноты и целостности потока данных применяются механизмы контроля доставки и подтверждения получения сообщений, включая идентификацию пакетов, контроль последовательности, журналирование операций передачи и проверку контрольных сумм данных.

сбора к модулю хранения и далее к модулю вторичной обработки без формирования управляющих воздействий.

**D. Целостность, регулярность и системность данных**

Ключевым требованием является сохранение целостности, регулярности и системности измерений [1].

Хранилище данных является централизованным репозиторием измерительной информации для аналитических модулей, обеспечивая трассируемость,



**Расшифровка**

**RAW** - сырые (необработанные) данные измерений.

**PROC** - обработанные данные и результаты интерпретаций.

**Events** - структурированные сообщения измерений.

**Metadata** - временные метки, параметры конфигурации, идентификаторы контроля целостности.

Рис. 4. Технологическая реализация модульной архитектуры и механизмы интеграции компонентов.

Это позволяет выявлять потери или неполную передачу информации. Обратные потоки, направленные на измерительные модули, отсутствуют: система не формирует управляющих воздействий и функционирует как информационный контур, как показано на рисунке 3.

Передача информации осуществляется от модуля

сопоставимости измерений и возможность повторной обработки по историческим данным (смотреть рисунок 3), в том числе с применением новых методик.

Для этого вместе с первичными данными сохраняются расширенные метаданные (временные метки, идентификаторы измерительных модулей, сведения о конфигурации и калибровке, флаги качества

данных), обеспечивающие трассируемость и возможность повторной интерпретации результатов. Централизованное накопление исторических массивов позволяет выполнять повторную обработку данных при изменении алгоритмов анализа, что особенно важно для спектрометрических измерений и статистической интерпретации временных рядов [12], [13].

Указанные требования к регулярности, системности и обработке по данным долговременного хранения определяют целесообразность использования асинхронных механизмов передачи данных и отделения измерительного контура от контуров хранения, и аналитической обработки [10], [11].

#### *Е. Технологическая реализация архитектуры и механизмы интеграции*

Технологическая реализация модульной архитектуры и используемые механизмы интеграции показаны на рисунке 4.

С точки зрения технологической реализации модульная архитектура естественно отображается на событийно-ориентированную модель обмена данными, в которой первичные измерения и спектры формируют поток данных, а последующие модули выполняют их доставку, хранение и аналитическую обработку независимо и асинхронно. Такой подход снижает связность компонентов, повышает устойчивость к сбоям и соответствует условиям эксплуатации в регламентированной инфраструктуре с повышенными требованиями к надежности и изоляции [10], [11].

Первичные измерения и спектры целесообразно представлять, как события (сообщения потока данных), передаваемые через брокера сообщений или журнал событий с поддержкой буферизации, механизмов повторной доставки и контроля полноты передаваемых данных. Контроль достоверности (целостности) доставки реализуется как сквозная проверка по цепочке модулей: при формировании сообщения модуль сбора вычисляет контрольную характеристику (например, CRC/хэш) для полезной нагрузки и метаданных и передает её вместе с идентификатором сообщения (номер последовательности, временная метка, идентификатор измерительного модуля). Модуль передачи и модуль хранения выполняют повторную проверку контрольной характеристики после приема и подтверждают результат (АСК/квитирование) в обратном служебном канале. Возврат осуществляется не для всего массива данных, а для контрольной информации и статуса проверки, что достаточно для выявления частичной доставки (например, «половина потока прошла, половина нет») и для автоматического запроса повторной передачи недостающих сообщений. Для пакетной передачи дополнительно используется контроль полноты по диапазонам последовательных идентификаторов и журналирование факта приема в реплицируемом логе.

Архитектура журналов событий в виде реплицируемого лога применяется для построения устойчивых конвейеров данных и обеспечивает возможность повторного воспроизведения (replay)

исторических интервалов без вмешательства в измерительный контур [17], [18]. Механизмы контрольных сумм и проверок целостности на уровне пакетов/батчей являются стандартной практикой для потоковой передачи и журналов событий; например, в формате сообщений Apache Kafka контрольная сумма CRC покрывает данные записи (батча), что позволяет обнаруживать и отклонять поврежденные фрагменты при чтении/доставке [19]. Это соответствует приоритетам целостности и регулярности данных, поскольку вторичная обработка выполняется асинхронно по хранилищу и не предъявляет требований минимальной задержки.

Для потребителей данных верхнего уровня (графические пользовательские интерфейсы, отчетность, интеграция с информационными системами предприятия) предпочтителен интерфейс чтения в стиле REST поверх HTTP, обеспечивающий простую совместимость и стандартные семантики доступа к данным [20]. При этом межсервисное взаимодействие расчетных модулей (например, спектрометрическая обработка, анализ временных рядов, управление метаданными) целесообразно реализовать с использованием gRPC как RPC-подхода с формализованными контрактами и эффективной сериализацией данных, что упрощает развитие системы и версионирование интерфейсов [21], [22].

При практическом внедрении система масштабируется по количеству первичных измерительных модулей и расчетных модулей: множество изолированных измерительных комплексов формируют события, которые агрегируются в интегральном хранилище данных (с выделением хранилища сырых данных и хранилища обработанных данных). В этом смысле архитектура описывается как «обратное дерево»: от интегрального хранилища можно проследить происхождение данных до конкретных измерительных модулей и каналов (трассируемость), а от хранилища обработанных данных – к набору модулей вторичной обработки, формирующих результаты интерпретации.

Модули вторичной обработки при этом также образуют масштабируемое «дерево»: наряду с базовыми модулями (например, обработка спектров, обработка химических параметров, анализ фазово-дисперсного состава, анализ контекста режимов эксплуатации объекта) возможна интеграция авторских расчетных модулей сторонних организаций. Такие модули могут выполнять обработку на своей стороне и передавать результаты в хранилище обработанных данных либо хранить результаты в локальных репозиториях с регистрацией метаданных и ссылок на вычисления.

Поскольку внешние расчетные модули потенциально могут обращаться к данным извне защищенного контура, доступ к хранилищу сырых данных должен оставаться изолированным. Внешняя интеграция выполняется через контролируемый контур доступа: шлюз публикации данных, предварительная верификация подключаемых модулей/устройств, проверка доверия и политик безопасности, а также изоляция исполнения.

Это снижает риск несанкционированного воздействия на первичные данные и сохраняет неизменность оригиналов измерений.

измерения, передачи, хранения и аналитической обработки, приведена на рисунке 5.

Обращаю ваше внимание, что взаимодействие слоёв происходит через передачу данных. Управляющие

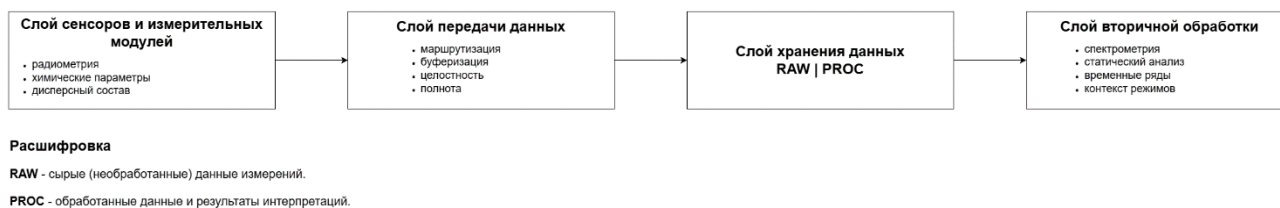


Рис. 5. Включение автоматизированной системы радиационно-химического контроля в контур обращения с ЖРО и ЖРС.

Модуль	Роль	Описание роли
Модуль сбора	Формирование событий	Генерация первичных измерительных данных (радиометрические параметры, спектры, химические показатели, фазово-дисперсный состав).
Модуль передачи	Доставка и контроль полноты	Агрегация, маршрутизация и буферизация сообщений, контроль целостности и полноты передачи, подтверждение доставки.
Модуль хранения	Долговременное хранение	Разделённое хранение сырых данных (RAW), обработанных данных (PROC) и служебных метаданных; обеспечение трассируемости и сопоставимости измерений.
Модуль первичной обработки	Подготовка данных	Нормализация форматов, учёт фоновых составляющих, формирование контрольных характеристик качества данных, подготовка к аналитической обработке.
Модуль вторичной обработки	Аналитическая интерпретация	Спектрометрическая обработка, статистический анализ, анализ временных рядов и корреляций, интерпретация накопленных исторических данных.
Модуль доступа	Доступ и интеграция	Предоставление контролируемого доступа к данным для внутренних и внешних потребителей, поддержка интеграции с внешними аналитическими модулями.
Внешние модули	Расширенная аналитика	Реализация авторских алгоритмов интерпретации с публикацией результатов в хранилище PROC при сохранении изоляции RAW.

Таблица 1. Ролевая модель программных модулей автоматизированной системы радиационно-химического контроля.

С точки зрения архитектурного стиля, микросервисная декомпозиция может рассматриваться как опциональное направление развития системы, обеспечивающее независимое масштабирование аналитических и пользовательских компонентов. Однако в условиях закрытой инфраструктуры объектов использования атомной энергии целесообразно рассматривать микросервисы как средство эволюции системы, а не как обязательное исходное требование. Базовый принцип остается неизменным: измерительный контур формирует события, хранилище данных является централизованным репозиторием измерительной информации, а аналитическая обработка выполняется по историческим данным без обратных управляющих воздействий [1], [13], [17].

#### IV. ПОСЛОЙНАЯ АРХИТЕКТУРА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Послойная архитектура аппаратно-программного комплекса, отражающая разделение функций

воздействия отсутствуют.

Для уточнения проектных решений далее вводятся два взаимодополняющих представления:

(1) функционально-ролевая модель программных модулей, определяющая распределение функций между модулями сбора, передачи, хранения (сырых и обработанных данных) и модулями первичной/вторичной обработки. Описание функционально ролевой модели приведено в таблице 1;

(2) физическая схема вычислительных устройств, отражающая, на каких вычислительных средствах реализуются указанные модули (контроллеры измерительных комплексов, шлюзы, сервер(а) хранения, вычислительные модули аналитики). Физическая схема вычислительных устройств представлена на рисунке 6.

Указанные схемы согласуются между собой через точки обмена данными и обеспечивают трассируемость реализации архитектуры от логических ролей к физическим компонентам.

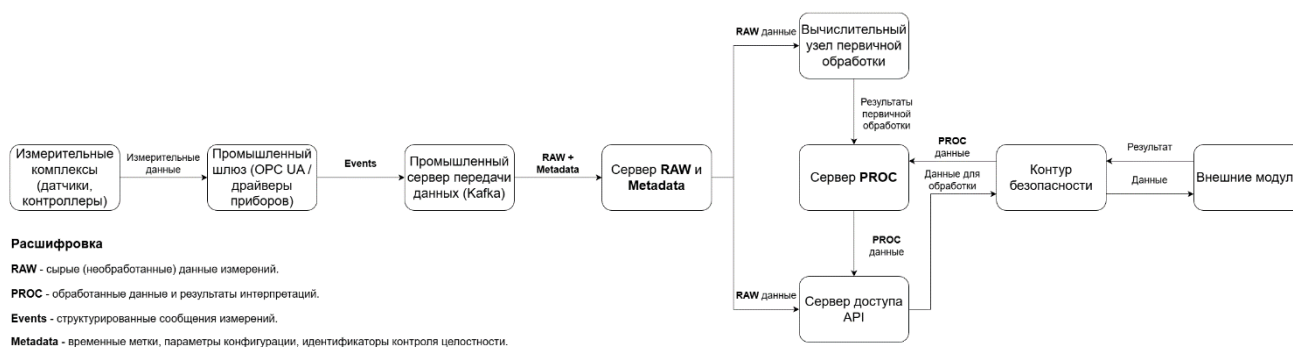


Рис. 6. Физическая схема вычислительных устройств.

Модульная организация задаёт последовательность жизненного цикла данных, а технологическая проекция архитектуры определяет механизмы интеграции между модулями (событийный обмен, интерфейсы чтения и межсервисные вызовы). Для обоснования проектных решений также полезно послышное представление системы, отделяющее физические измерительные процессы от транспортных, функций хранения и аналитических функций [2]-[4], [9]. На объектах использования атомной энергии принципиально, что взаимодействие слоёв осуществляется через данные и хранилище (долговременное хранилище), а не через управляющие воздействия, что обеспечивает сопоставимость и проверяемость результатов и изоляцию измерительного контура от алгоритмов обработки [1], [13], [17].

#### A. Слой сенсоров и измерительных модулей

На нижнем уровне расположены радиометрические и химические измерительные модули (проточные и периодические), реализующие измерения в соответствии с методиками и нормативами [5], [6], [12]. Функция слоя – корректное преобразование физико-химических величин в цифровую форму и формирование первичных данных и метаданных [14]. Интерпретация результатов на данном уровне не выполняется [1].

#### B. Слой хранения исторических данных

Слой хранения предназначен для долговременного накопления временных рядов параметров, спектров и расширенных метаданных [1], [13]. Слой логически разделяется на хранилище сырых (необработанных) данных, обеспечивающее неизменность и доступность оригиналов измерений, и хранилище обработанных данных, содержащее результаты первичной и вторичной обработки и данные интерпретации. Такое разделение поддерживает разнесённое резервирование и контроль доступа, включая изоляцию сырых данных при интеграции внешних модулей обработки.

#### C. Слой вторичной (расчетной) обработки

На этом уровне реализуются аналитические функции: обработка спектров, расчет радиометрических характеристик, статистический анализ, поиск корреляций и закономерностей [5], [12], [14]. Слой использует данные из хранилища, что обеспечивает сопоставимость и проверяемость результатов и

отделение аналитики от измерений [1].

#### D. Одноранговые измерительные комплексы и отсутствие функций управления

Система не формирует управляющей иерархии датчиков: первичные измерения поступают от набора одноранговых измерительных комплексов, интегрируемых через хранилище данных и общую модель событий. Поток данных направлен от сенсорного слоя к аналитическим без обратных управляющих сигналов [9]. Это подчеркивает диагностический характер радиационно-химического контроля и отличает его от IoT/CPS-платформ управления [4], [11].

### V. ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ И МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ ДАННЫХ

Архитектура системы должна учитывать различия в формате потоков данных по различным каналам измерений физико-химических параметров среды: данных автохимконтроля, результатов радиационного контроля и контроля фазово-дисперсных параметров [1], [5]. Эти различия задают требования к структуре данных измерений, метаданных, организации передачи и хранения информации и методам вторичной обработки [13].

Рациональным целевым набором измеряемых параметров для системного онлайн-контроля может являться перечень, приведённый в таблице 2. Перечень носит обобщённый характер и задаёт верхнеуровневый перечень параметров, в дальнейшем требующий детализации.

#### A. Радиационные параметры ЖРС

Первичные радиационные параметры могут контролироваться интегральными значениями активности и/или спектрами [5]. Спектры определяются суперпозицией вкладов радионуклидов, фона и шумов. Для содержательного контроля и понимания эффективности обращения с ЖРС требуется анализ более детальной информации о радионуклидном составе, как минимум по дозообразующим радионуклидам. Для этого необходима математическая обработка первичных экспериментальных данных – решение обратной задачи для определения радионуклидного состава [12], [14]. Для получения достоверных данных о радионуклидном составе

обработка спектров реализуется последовательно, в два этапа: обработка спектров реализуется последовательно, в два этапа: деградацией элементов в агрессивной среде [1]. Поэтому информативность проявляется в динамике

Название группы параметров	Параметры
Радиометрические параметры	Общая альфа-активность, Общая бета-активность, Тритий H-3, Sr-90, Ni-63, Cl-36, C-14
Гамма-излучающие радионуклиды	Cs-137, Cs-134, Co-60, Sb-125, Sb-124, Mn-54, K-40, Se-75, Sn-113, Co-58, Zn-65, Nb-95, Be-7, Zr-95, Na-22, Am-241, U-235, U-238
Химические параметры	pH, Электропроводность/Минерализация, Сухой остаток, Щёлочность, Бор, Натрий, Калий, Железо, Нитрат-ион, Нитрит-ион, Хлорид-ион, Сульфат-ион, Аммоний-ион, Карбонаты, Гидрокарбонаты, Кремнекислота, ХПК (химическое потребление кислорода), Нефтепродукты, АПАВ (массовая концентрация анионных поверхностно-активных веществ), Фосфат-ион, Перманганатная окисляемость, Оксалаты
Специальные параметры	Дисперсный состав, Радионуклидный состав твёрдой фазы, Комплексные соединения Co-ЭДТА

Таблица 2. Рациональный целевой набор измеряемых параметров.

### В. Радиационные параметры ЖРС

Первичные радиационные параметры могут контролироваться интегральными значениями активности и/или спектрами [5]. Спектры определяются суперпозицией вкладов радионуклидов, фона и шумов. Для содержательного контроля и понимания эффективности обращения с ЖРС требуется анализ более детальной информации о радионуклидном составе, как минимум по дозообразующим радионуклидам. Для этого необходима математическая обработка первичных экспериментальных данных – решение обратной задачи для определения радионуклидного состава [12], [14]. Для получения достоверных данных о радионуклидном составе обработка спектров реализуется последовательно, в два этапа:

(1) первичная обработка (приведение форматов, нормализация, учёт фона, фильтрация шумов и обеспечение сопоставимости);

(2) вторичная спектрометрическая обработка, составляющая суть обратной задачи спектрометрии (обработка пиков, деконволюция/аппроксимация и оценка вкладов компонентов, вариационные расчеты с минимизацией невязок модели).

Для отдельных нуклидов применяются специализированные методики, в том числе с регламентированными стандартами [24]-[26].

В целом, необходимо понимать, что востребованные для контроля технологического процесса параметры не подлежат прямому экспериментальному определению, а требуют нетривиальной математической обработки результатов измерений.

### С. Химические параметры

Химические параметры водных сред характеризуются многокомпонентностью: pH, электропроводность, ионный состав, показатели окисляемости и др. [6], [27], [28]. Данные генерируются различными измерительными приборами и поступают по многим каналам. При этом между ними существует большой набор взаимозависимостей. Для части параметров характерны ограниченное разрешение и дрейф измерений, обусловленный особенностями методов и

во времени при совместном анализе показателей: выявлении трендов, дрейфа, контроля согласованности изменений и мониторинга внутренних противоречий [4].

### Д. Фазово-дисперсный состав

Для жидких радиоактивных сред существенное значение имеет фазово-дисперсный состав, включая наличие твердых, жидких и гелевых включений, распределение твердых и капельных элементов по размерам. Необходимо учитывать возможное перераспределение радионуклидов между жидкой и твердой фазой. Поэтому в системе выделяется отдельное направление вторичной обработки, связанное с анализом дисперсного состава и его динамики во времени, а также в увязке с радиометрическими и химическими параметрами.

### Е. Необходимость расчетного узла вторичной обработки

Можно сделать вывод о недостаточности фиксации только прямых приборных измерений первичных радиационных, химических и других параметров среды для понимания ее состояния и оценки эффективности обращения с ЖРС. Это приводит к необходимости включения в архитектуру системы расчетного узла вторичной математической обработки и интерпретации экспериментальных данных. Этот элемент может включать базовые модули (типовые процедуры обработки спектров, химических параметров и дисперсного состава) и авторские модули внешних организаций/экспертов, выполняющих специализированный анализ и интерпретацию. Базовые модули обеспечивают обязательный диагностический минимум, а авторские модули расширяют аналитические возможности без изменения измерительного контура.

Функционально расчётная обработка распадается на два уровня:

(1) обязательный уровень первичной обработки, обеспечивающий приведение данных к сопоставимому виду и формирование базовых диагностических характеристик;

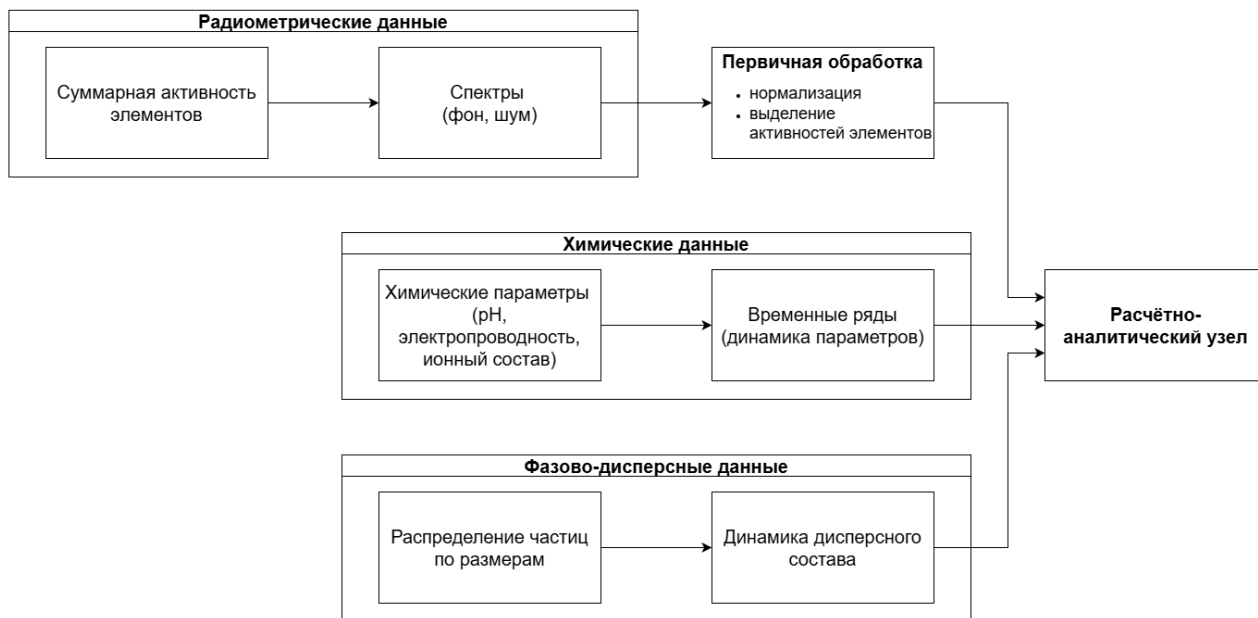
(2) уровень аналитики для расчетного формирования содержательного набора параметров среды по

первичным данным, а также анализа исторических данных, включающий анализ временных рядов, корреляции и контекстную интерпретацию, выполняемый по накопленным данным и допускающий подключение внешних экспертных модулей.

Различия между химическими многоканальными параметрами и радиометрическими спектрами, а также роль расчетного узла вторичной обработки в их интерпретации, схематично показаны на рисунке 7.

### В. Выделение радионуклидного состава

Для выделения радионуклидного состава применяются методы аппроксимации пиков, деконволюции и решения спектрометрических задач, учитывающие перекрытие линий и влияние фона [12], [14]. Для отдельных нуклидов используются специализированные методики определения [24] и соответствующие стандартизованные процедуры [25], [26].



### Расшифровка

**Первичная обработка** - подготовка данных и контроль целостности данных.

**Аналитика по истории** - интерпретация по накопленным данным.

Рис. 7. Типы химических и радиометрических данных и роль расчетно-аналитического узла вторичной обработки.

## VI. РАСЧЕТНЫЙ УЗЕЛ И МЕТОДЫ ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Расчетный узел является центральным аналитическим компонентом системы и обеспечивает переход от первичных измерений к интерпретируемым характеристикам состояния сред [1]. Его роль особенно важна при работе со спектрами и многоканальными химическими данными, где выводы опираются на анализ накопленной истории, а не на единичное измерение [5], [12].

### А. Обработка радиометрических данных и спектров

Первичной формой данных являются спектры или интегральные показатели активности [5]. В расчетном узле выполняется первичная обработка (обязательный уровень): приведение форматов, нормализация, учет фона, фильтрация шумов и обеспечение сопоставимости данных, полученных в разные моменты времени [12], [14]. Выполнение обработки над архивными данными исключает обратное влияние аналитики на процесс измерения [1].

Существенное значение имеет устойчивость к шумам и погрешностям, что достигается использованием накопленных данных и сопоставлением спектров во времени [12].

### С. Анализ исторических данных

Анализ временных рядов позволяет выявлять устойчивые тенденции, переходные режимы и медленно развивающиеся изменения [13]. История измерений используется для оценки стабильности параметров, выявления дрейфа характеристик и сравнения текущего состояния с ранее зафиксированными [1]. Это особенно важно при ограниченном разрешении отдельных измерений и наличии случайных отклонений.

### Д. Корреляция химических параметров

Химические показатели образуют многомерное пространство данных [6]. Корреляционный и статистический анализ позволяет выявлять взаимосвязи параметров, согласованные группы изменений и аномальные сочетания, нехарактерные для нормальных условий [3], [13]. Такой подход повышает

информативность системы без усложнения измерительного контура.

#### *Е. Связь динамики параметров с режимами работы объектов использования атомной энергии*

Режимы эксплуатации объектов использования атомной энергии используются как контекст для интерпретации: сопоставление динамики параметров с пусками/остановами и другими состояниями повышает корректность выводов [1]. При этом система не осуществляет управление режимами и не формирует управляющих воздействий; информация о режимах применяется исключительно как дополнительный аналитический признак [9].

#### *Ф. Интеграция с внешними исследовательскими модулями*

Для расширения аналитики допускается интеграция внешних (авторских) модулей обработки, получающих доступ к данным через контролируемый интерфейс чтения и контур безопасности. Результаты работы внешних модулей сохраняются в хранилище обработанных данных (репозиторий интерпретаций) с регистрацией метаданных вычисления (версия алгоритма, параметры, временной интервал, идентификатор модуля), что обеспечивает сопоставимость результатов и возможность повторной интерпретации без изменения первичных данных.

### VII. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Предложенные архитектурные решения демонстрируют, что переход от разрозненных измерений к системному накоплению данных расширяет возможности радиационно-химического контроля ЖРО/ЖРС. Вместо эпизодических лабораторных результатов формируется целостный информационный контур, где измерения, доставка, хранение и аналитика рассматриваются как единый цикл. Это согласуется с тенденциями цифровизации и развитием архитектур данных в промышленности.

#### *А. Значение системного подхода к накоплению данных*

Формирование исторических массивов позволяет перейти от локальной интерпретации отдельных проб к анализу динамики во времени. Это повышает информативность контроля в условиях вариабельности сред и ограниченного разрешения измерений. История данных обеспечивает выявление трендов и переходных режимов, которые остаются незаметными при эпизодических измерениях.

#### *В. Возможности расширения аналитического блока*

Архитектура расчетного узла обладает потенциалом расширения: накопленные массивы данных создают предпосылки для применения более сложных статистических и модельных методов. Существенное преимущество – возможность наращивать аналитику без изменения измерительного контура, что важно при регламентированных условиях эксплуатации.

#### *С. Использование системы как основы для цифровых моделей*

Структурированные данные могут служить основой для цифровых моделей процессов обращения с ЖРО/ЖРС. В данном контексте модели используются для аналитики и прогноза, не формируя управляющих воздействий и не вмешиваясь в технологические процессы.

#### *Д. Ограничения текущего этапа исследования*

На текущем этапе не рассматривается полный цикл внедрения системы в промышленную эксплуатацию и не проводится количественная оценка эффективности аналитических методов на длительных интервалах. Кроме того, часть параметров и радионуклидов требует периодических лабораторных методов, регламентированных стандартами. Это ограничивает полноту онлайн-контроля и отражает особенности радиационно-химического анализа.

### VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена и обоснована архитектура автоматизированной системы радиационно-химического контроля жидких радиоактивных сред и отходов, ориентированная на системный сбор, накопление и анализ измерительных данных в условиях эксплуатации объектов использования атомной энергии. Показано, что эффективный контроль ЖРО и ЖРС невозможен без перехода к целостному информационно-измерительному контуру, обеспечивающему формирование исторических массивов и их аналитическую интерпретацию.

Сформирована модульная и послойная архитектура, в которой разделены функции измерения, передачи, хранения и вторичной обработки данных. Отдельно выделен расчетный узел как обязательный элемент, обеспечивающий спектрометрическую и статистическую интерпретацию накопленных данных и сопоставимость и проверяемость результатов. Предложенный подход согласуется с рекомендациями по радиационному мониторингу и может быть использован при проектировании и модернизации систем контроля ЖРО/ЖРС, а также для развития аналитических методов и цифровых моделей на основе накопленных данных.

В результате работы достигнут концептуальный (эскизный) уровень проектирования автоматизированной системы радиационно-химического контроля: определены объект и предмет, сформулированы ключевые ограничения, проработана модульная и послойная архитектура, выделены контуры сбора/передачи/хранения (с разделением на сырые и обработанные данные) и контуры первичной и вторичной обработки. Разработанные схемы и описания фиксируют состав модулей, потоки данных и принципы интеграции, что позволяет переходить к этапам детального проектирования и последующей реализации.

### БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] M. Balonov, G. Linsley, D. Louvat, C. Robinson, and T. Cabianca, "The IAEA standards for the radioactive discharge control: Present

- status and future development,” *Radioprotection*, vol. 40, no. S1, pp. S721–S726, 2005, doi: 10.1051/radiopro:2005s1-105.
- [2] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, “The Internet of Things: A survey,” *Computer Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.
- [3] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, “Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.future.2013.01.010.
- [4] L. D. Xu, W. He, and S. Li, “Internet of Things in industries: A survey,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2233–2243, Nov. 2014, doi: 10.1109/TII.2014.2300753.
- [5] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2010.
- [6] APHA, AWWA, and WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd ed. Washington, DC, USA: American Public Health Association, 2017.
- [7] M. M. Basharatyan, “Digitalization as a source of sustainable development of Russian industry in the conditions of innovative economy,” *Economics and Society: Modern Development Models*, vol. 11, no. 3, pp. 245–258, 2021, doi: 10.18334/ecsoc.11.3.113453.
- [8] V. V. Dorzhieva, “Digital transformation of industry and industrial policy under external constraints,” *Russian Journal of Innovation Economics*, vol. 13, no. 2, pp. 637–648, 2023, doi: 10.18334/vinec.13.2.117692.
- [9] J. Lee, B. Bagheri, and H.-A. Kao, “A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems,” *Manufacturing Letters*, vol. 3, pp. 18–23, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
- [10] M. Wollschlaeger, T. Sauter, and J. Jasperneite, “The future of industrial communication: Automation networks in the era of the Internet of Things and Industry 4.0,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 11, no. 1, pp. 17–27, Mar. 2017, doi: 10.1109/MIE.2017.2649104.
- [11] J. Kreps, N. Narkhede, and J. Rao, “Kafka: A distributed messaging system for log processing,” presented at the NetDB’11 Workshop, Athens, Greece, Jun. 2011.
- [12] G. Gilmore, *Practical Gamma-Ray Spectrometry*, 2nd ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2008.
- [13] M. Ge, H. Bangui, and B. Buhnova, “Big data for Internet of Things: A survey,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 87, pp. 601–614, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.future.2018.04.053.
- [14] K. Debertin and R. G. Helmer, *Gamma- and X-ray Spectrometry with Semiconductor Detectors*. Amsterdam, The Netherlands: North-Holland, 1988.
- [15] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks: A survey,” *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, Mar. 2002, doi: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4.
- [16] V. C. Gungor and G. P. Hancke, “Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 10, pp. 4258–4265, Oct. 2009, doi: 10.1109/TIE.2009.2015754.
- [17] M. B. M. Noor and W. H. Hassan, “Current research on Internet of Things (IoT) security: A survey,” *Computer Networks*, vol. 148, pp. 283–294, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.comnet.2018.11.025.
- [18] M. Kleppmann and J. Kreps, “Kafka, Samza and the Unix philosophy of distributed data,” *IEEE Data Engineering Bulletin*, vol. 38, no. 4, pp. 4–14, Dec. 2015.
- [19] Apache Software Foundation, “Message format,” *Apache Kafka Documentation* [Online]. Available: <https://kafka.apache.org/41/implementation/message-format/>
- [20] R. T. Fielding, *Architectural Styles and the Design of Network-Based Software Architectures*, Ph.D. dissertation, Univ. California, Irvine, CA, USA, 2000.
- [21] G. Thiyagarajan, V. Bist, and P. Nayak, “Strengthening gRPC security in microservices: A proxy-based approach for mTLS, JWT, and RBAC enforcement,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 187, no. 28, Aug. 2025, doi: 10.5120/ijca2025925359.
- [22] Google, “Introducing gRPC, a new open source HTTP/2 RPC framework,” 2015 [Online]. Available: <https://developers.googleblog.com/en/introducing-grpc-a-new-open-source-http2-rpc-framework/>
- [23] M. Schleipen, R. Henßen, M. Damm, A. Lüder, N. Schmidt, O. Sauer, and S. Hoppe, “OPC UA and AutomationML – collaboration partners for one common goal: Industry 4.0,” in *Proc. 3rd AutomationML User Conf.*, Blomberg, Germany, Oct. 2014.
- [24] N. Sarap, M. Jankovic, and G. Pantelic, “Validation of radiochemical method for the determination of Sr-90 in environmental samples,” *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 225, 2014, doi: 10.1007/s11270-014-2003-0.
- [25] International Organization for Standardization, *Water quality – Gross beta activity – Test method using thick source*, ISO 9697:2018, 2018.
- [26] International Organization for Standardization, *Water quality – Tritium – Test method using liquid scintillation counting*, ISO 9698:2019, 2019.
- [27] International Organization for Standardization, *Water quality – Determination of pH*, ISO 10523:2008, 2008.
- [28] International Organization for Standardization, *Water quality – Determination of electrical conductivity*, ISO 7888:1985, 1985.

*Статья получена 23 февраля 202606.04.2026*

*Жабицкий Михаил Георгиевич, Национальный Исследовательский Ядерный Университет МИФИ, заместитель директора ВИШ, jabitsky@mail.ru*

*Полянский Андрей Павлович, Национальный Исследовательский Ядерный Университет МИФИ, магистрант, pap011@campus.mephi.ru*

# Liquid Radioactive Waste and Mixtures Radiation and Chemical Monitoring Automation

A.P. Poljanskii, M.G. Zhabitskii

**Annotation**— Nuclear facilities require continuous and accurate radiation and chemical monitoring for liquid radioactive waste and liquid radioactive media. Classical laboratory testing methods allow for highly accurate measurement of the test medium. But they require significant time delays associated with sampling, sample preparation, and subsequent measurements. This creates an information gap between the actual and measurable states of the environment. In addition, many chemical and phase-dispersed parameters undergo changes associated with oxidation and sludge deposition.

This paper presents an approach to the construction of systematic automated radiation and chemical control of liquid radioactive waste and media. It includes regular streaming raw data collection, transmission, long-term storage, and the potential for processing and analysis for rapid response during operation and systematic post-processing. The proposed system is designed for diagnostic analysis of the environment. It does not control technological processes. The main attention is paid to the data architecture that ensures the isolation of modules for collecting, transmitting and storing information, as well as compliance with information and functional security requirements.

The proposed concept will make it possible to use the accumulated historical measurement data in existing and designed control and analysis systems. The results of the work can be used in the creation and improvement of current radiation monitoring systems at nuclear facilities.

**Keywords**—data architecture, LRW, radiation and chemical control, spectrometry, ACC, architecture of information systems

## REFERENCES

- [1] M. Balonov, G. Linsley, D. Louvat, C. Robinson, and T. Cabcianca, "The IAEA standards for the radioactive discharge control: Present status and future development," *Radioprotection*, vol. 40, no. S1, pp. S721–S726, 2005, doi: 10.1051/radiopro:2005s1-105.
- [2] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The Internet of Things: A survey," *Computer Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.
- [3] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.future.2013.01.010.
- [4] L. D. Xu, W. He, and S. Li, "Internet of Things in industries: A survey," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2233–2243, Nov. 2014, doi: 10.1109/TII.2014.2300753.
- [5] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2010.
- [6] APHA, AWWA, and WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd ed. Washington, DC, USA: American Public Health Association, 2017.
- [7] M. M. Basharatyan, "Digitalization as a source of sustainable development of Russian industry in the conditions of innovative economy," *Economics and Society: Modern Development Models*, vol. 11, no. 3, pp. 245–258, 2021, doi: 10.18334/ecsoc.11.3.113453.
- [8] V. V. Dorzhieva, "Digital transformation of industry and industrial policy under external constraints," *Russian Journal of Innovation Economics*, vol. 13, no. 2, pp. 637–648, 2023, doi: 10.18334/vinec.13.2.117692.
- [9] J. Lee, B. Bagheri, and H.-A. Kao, "A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems," *Manufacturing Letters*, vol. 3, pp. 18–23, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
- [10] M. Wollschlaeger, T. Sauter, and J. Jasperneite, "The future of industrial communication: Automation networks in the era of the Internet of Things and Industry 4.0," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 11, no. 1, pp. 17–27, Mar. 2017, doi: 10.1109/MIE.2017.2649104.
- [11] J. Kreps, N. Narkhede, and J. Rao, "Kafka: A distributed messaging system for log processing," presented at the NetDB'11 Workshop, Athens, Greece, Jun. 2011.
- [12] G. Gilmore, *Practical Gamma-Ray Spectrometry*, 2nd ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2008.
- [13] M. Ge, H. Bangui, and B. Buhnova, "Big data for Internet of Things: A survey," *Future Generation Computer Systems*, vol. 87, pp. 601–614, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.future.2018.04.053.
- [14] K. Debertin and R. G. Helmer, *Gamma- and X-ray Spectrometry with Semiconductor Detectors*. Amsterdam, The Netherlands: North-Holland, 1988.
- [15] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: A survey," *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, Mar. 2002, doi: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4.
- [16] V. C. Gungor and G. P. Hancke, "Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 10, pp. 4258–4265, Oct. 2009, doi: 10.1109/TIE.2009.2015754.
- [17] M. B. M. Noor and W. H. Hassan, "Current research on Internet of Things (IoT) security: A survey," *Computer Networks*, vol. 148, pp. 283–294, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.comnet.2018.11.025.
- [18] M. Kleppmann and J. Kreps, "Kafka, Samza and the Unix philosophy of distributed data," *IEEE Data Engineering Bulletin*, vol. 38, no. 4, pp. 4–14, Dec. 2015.
- [19] Apache Software Foundation, "Message format," *Apache Kafka Documentation* [Online]. Available: <https://kafka.apache.org/41/implementation/message-format/>
- [20] R. T. Fielding, *Architectural Styles and the Design of Network-Based Software Architectures*, Ph.D. dissertation, Univ. California, Irvine, CA, USA, 2000.
- [21] G. Thiagarajan, V. Bist, and P. Nayak, "Strengthening gRPC security in microservices: A proxy-based approach for mTLS, JWT, and RBAC enforcement," *International Journal of Computer Applications*, vol. 187, no. 28, Aug. 2025, doi: 10.5120/ijca2025925359.
- [22] Google, "Introducing gRPC, a new open source HTTP/2 RPC framework," 2015 [Online]. Available: <https://developers.googleblog.com/en/introducing-grpc-a-new-open-source-http2-rpc-framework/>
- [23] M. Schleipen, R. Henßen, M. Damm, A. Lüder, N. Schmidt, O. Sauer, and S. Hoppe, "OPC UA and AutomationML – collaboration partners for one common goal: Industry 4.0," in *Proc. 3rd AutomationML User Conf.*, Blomberg, Germany, Oct. 2014.
- [24] N. Sarap, M. Jankovic, and G. Pantelic, "Validation of radiochemical method for the determination of Sr-90 in environmental samples," *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 225, 2014, doi: 10.1007/s11270-014-2003-0.
- [25] International Organization for Standardization, *Water quality – Gross beta activity – Test method using thick source*, ISO 9697:2018, 2018.
- [26] International Organization for Standardization, *Water quality – Tritium – Test method using liquid scintillation counting*, ISO 9698:2019, 2019.
- [27] International Organization for Standardization, *Water quality – Determination of pH*, ISO 10523:2008, 2008.
- [28] International Organization for Standardization, *Water quality – Determination of electrical conductivity*, ISO 7888:1985, 1985.