

РГБ ОА

23 ОКТ 1995

На правах рукописи

ПРОКОПЧИНА Светлана Васильевна

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ
БАЙЕСОВСКОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ
В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Специальность: 05.11.16 - Информационно-измерительные
системы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург - 1995

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете им. В.И.Ульянова (Ленина).

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Кондрашкова Г.А.

доктор технических наук, профессор Кнорринг В.Г.

доктор технических наук, профессор Угрюмов Е.П.

Ведущая организация - Научно-исследовательский институт
электроизмерительных приборов

Защита диссертации состоится "24" мая 1995 г.
в 11 час. на заседании диссертационного совета Д 063.36.02
С.-Петербургского государственного электротехнического универси-
тета им. В.И.Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, С.-Петербург,
ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан "12" октября 1995 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Исаков А.Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы работы. Современные научные и практические измерительные задачи характеризуются комплексностью целей, сложностью объектов и условий измерений, что выдвигает ряд дополнительных требований к методам и средствам их решения. К числу подобных задач относится задача мониторинга сложных технических и природных объектов, которая в данной работе понимается как задача определения и контроля свойств и состояний сложного объекта (СО) в режиме его функционирования и активного взаимодействия с окружающей средой, а также выработки управляющих решений и рекомендаций. Специфика измерительных ситуаций при решении задач мониторинга СО состоит в том, что информация, получаемая в измерительном эксперименте, является всегда неполной и неточной в связи со сложностью познания свойств СО и влияющих факторов (ВФ) среды его функционирования (СФ). Неконтролируемые дополнительные погрешности результатов измерений, обусловленные неадекватностью априорной модели объекта измерения (ОИ) самому объекту, возникающие за счет неполного учета ВФ, как показывает измерительная практика, во многих подобных задачах оказываются весьма значительными и могут превосходить основную погрешность измерения. Однако, значимость для науки и народного хозяйства решений этих задач, их дальнейшее использование в познавательных, природоохранных и природопользовательских целях обуславливает особые требования к обеспечению их точности, достоверности, полноты и эффективности.

Методическая среда современных средств измерений, предназначенная для реализации измерительных процессов в ситуациях с незначительной или ограниченной априорной неопределенностью информации об ОИ не позволяет обобщать и использовать в процессе измерений разнообразную по форме априорную и текущую информацию, об ОИ и ВФ, что необходимо для обеспечения требуемого качества решения измерительной задачи. Для этого необходимо привлечение в измерительную среду методов теории искусственного интеллекта, позволяющих преобразование информации, представленной в форме знаний. Однако, современные методы этой теории не имеют возможности метрологического обоснования получаемых результатов, что не позволяет контролировать, равно как и обеспечивать, требуемый

уровень их качества. Это обуславливает необходимость создания методов и средств интеллектуализации измерений (ИИ), что позволило бы обеспечить требуемый уровень качества решений сложных измерительных задач на основе познания ОИ и ОФ, метрологическое обоснование результатов и поддержку этих функций информационно-измерительной системой (ИИС) при подготовке, реализации и интерпретации результатов измерений на формализованной основе в автоматизированном или автоматическом режимах.

Методология измерений на основе ИИ, информационные измерительные технологии (ИТ) и средства ее реализации в виде измерительных экспертных систем (ИЭС) и интеллектуальных измерительных комплексов являются перспективными для эффективного решения научных и народно-хозяйственных задач мониторинга сложных технических и природных объектов, что делает их разработку одной из основных современных задач, как для теории и практики измерений и метрологии, так и их прикладных сфер, чем и обуславливается актуальность темы данной работы.

Цель работы. Теоретическое обобщение и разработка методологии, алгоритмов, информационных технологий, программных средств байесовской интеллектуализации измерений (БИИ) для решения задач мониторинга СО, активно взаимодействующего со средой его функционирования, в условиях неполной, неточной и нечеткой информации и значительной априорной неопределенности знаний о СО на основе принципов измерительного подхода, учета разнообразной априорной и поступающей в процессе мониторинга информации, оптимизации мониторинга с целью обеспечения требуемого качества решений, методического и структурного развития средств мониторинга.

Поставленная цель достигается решением следующих вопросов:

- разработкой концепции БИИ, обеспечивающей методологическую основу для решения задач мониторинга СО в указанной выше постановке;
- разработкой регуляризирующего байесовского подхода (РБП) для повышения устойчивости и создания методической основы метрологии получаемых решений задачи мониторинга СО;
- созданием принципов и методов синтеза шкал БИИ в виде шкал с динамическими ограничениями (ШДО), позволяющих снимать ограничения моделей СО по мере получения новых знаний в процессе измерений, что обеспечивает возможность развития моделей, алго-

ритмов, технологий и средств в процессе мониторинга СО на основе методологии БИИ;

- разработкой методов и алгоритмов БИИ, реализующих конкретные виды БИИ при определении значений параметров, аналитических описаний функциональных зависимостей и их систем, а также для определения состояний СО в процессе мониторинга;

- разработкой способов обобщения числовой и лингвистической информации на методической основе БИИ, позволяющих решать задачи измерительных оценивания, контроля и управления и получать результаты не только в виде отдельных числовых значений, но и в виде аналитических зависимостей, выводов, решений, рекомендаций с полным метрологическим обоснованием их показателей точности, надежности и достоверности;

- разработкой информационных технологий БИИ статистического системного мониторинга сложных технических и природных объектов, процессов и систем;

- созданием экспертных, информационно-аналитических и советующих систем, реализующих прикладные информационные технологии БИИ для интеллектуальных комплексов мониторинга СО в условиях значительной априорной неопределенности знаний о нем.

Методы исследования, используемые в данной работе для достижения поставленных целей, объединяются на основе системного подхода к решаемой проблеме. Используются аппарат, принципы и основные положения теории измерений, метрологии, теории вероятностей, математической статистики, функционального анализа, оптимальных байесовских решений, теории распознавания образов, некорректных задач, искусственного интеллекта, методов и средств измерительной техники.

Научная новизна результатов диссертационной работы состоит в том, что автором разработаны концепция, методология, методы и алгоритмы параметрической, функциональной и системной БИИ, основывающиеся на РБИ, новом типе моделей и шкал с динамическими ограничениями, позволяющие: осуществлять синтез алгоритмов БИИ в процессе измерений на основе новых информационных технологий обобщения и получения измерительных знаний; обеспечивать полное метрологическое обоснование результатов; получать решения в числовой, формульной и лингвистической форме с учетом априорной и поступающей информации, а также в том, что на основе методологии

БМИ разработаны обобщенные методики синтеза развивающихся информационных технологий и средств мониторинга СО в условиях значительной априорной неопределенности.

Основные научные результаты, выдвигаемые на защиту, состоят в том, что впервые разработаны:

1) концепция, основные принципы и обобщенное уравнение БМИ, позволяющие обеспечивать требуемое качество измерений в условиях значительной неопределенности априорных знаний и поступающей в процессе измерений информации о СО и СФ, их активного взаимодействия и эволюции;

2) модель СО с динамическими ограничениями (МДО), адекватно отражающая свойства развивающихся СО и СФ, на основе которой предложена развивающаяся модель ОИ (МДО ОИ) с учетом ВФ и условий измерений;

3) регуляризирующий байесовский подход (РБП), синтезирующий принципы байесовского подхода, теории измерений и метрологии, что позволяет в сложных измерительных ситуациях получать устойчивые, метрологически обоснованные решения на основе всего объема априорной и поступающей информации об ОИ и ВФ;

4) концепция, формализованная запись и принципы синтеза шкалы с динамическими ограничениями (ШДО), адекватно отражающей свойства МДО ОИ и основные принципы БМИ; принципы синтеза сопряженных лингвистических ШДО БМИ для учета при измерениях качественной информации об ОИ и ВФ;

5) принципы, уравнения измерений и алгоритмы БМИ в задачах определения:

- характеристик СО, представленных в виде значений случайных величин (СВ) и случайных процессов (СП);

- моментных характеристик СВ и СП, включая коэффициенты асимметрии и эксцесса;

- статистик критериев проверки гипотез, что позволило разработать принципы синтеза обобщенных критериев проверки нечетких гипотез, обеспечивающих определение расстояния между проверяемой гипотезой и ее статистическим аналогом, а также между различными гипотезами, метрологическое обоснование результатов проверки, требуемое качество решений; на основе чего разработаны байесовские модификации известных критериев (критерия согласия χ^2 , критериев Стьюдента и Фишера);

- функциональных характеристик СВ и СП, в том числе законов распределений в унимодальной и многомодальной форме, а также их статистических представлений в форме гистограмм;

- характеристик систем СВ и СП, в числе которых многомерные законы распределения и их статистические оценки;

- интегральных характеристик состояния СО;

- контрольных выводов и управляющих рекомендаций в лингвистической форме;

6) обобщенная методика метрологического синтеза алгоритмов БИИ, обеспечивающая достижение требуемого качества измерений в сложных измерительных ситуациях, оптимизацию и планирование измерительных процессов БИИ в конкретных условиях измерений;

7) структура комплекса метрологических характеристик, включающая показатели точности, надежности и достоверности результатов БИИ, правила и принципы их функциональных преобразований, позволяющих создать автоматическое метрологическое сопровождение результатов БИИ в интеллектуальных измерительных системах;

8) концепция и обобщенная ИТ БИИ для мониторинга СО, которые позволяют создавать развивающиеся ИТ мониторинга свойств и состояний СО и их эволюции с метрологическим обоснованием качества решений, обеспечивающие непрерывное изучение СО и СФ; а также обобщенная методика синтеза шкал, алгоритмов и ИТ БИИ с заданными метрологическими характеристиками, требованиями и динамическими ограничениями;

9) новые аналитические зависимости, выводы и рекомендации для решения измерительных задач мониторинга сложных технических и природных объектов на основе БИИ.

Практическую ценность представляют конкретные методики, ИТ и ЭС, построенные на основе методологии, алгоритмов и обобщенной ИТ БИИ, которые включают:

- 1) ИТ статистического мониторинга СО на основе БИИ и созданную на ее основе ЭС "АССИСТЕНТ";

- 2) алгоритм БИИ в задачах статистического управления технологическим процессом механической обработки деталей, измерительного контроля качества продукции и переналадки технологического оборудования;

- 3) ИТ БИИ в задачах измерительного контроля характеристик и состояний измерительных приборов и систем, позволяющую опреде-

лять математические модели погрешностей приборов, оптимизировать методики поверки и исследовательской метрологической аттестации средств измерений;

4) ИТ, конкретные результаты и программные средства в задаче классификации объектов по изображениям, обеспечивающие классификацию с заданными метрологическими характеристиками и с высокой скоростью получения результатов решений на основе оптимизации системы признаков и алгоритмов классификации;

5) ИТ БИИ в ЭС "АССИСТЕНТ-ГИДРОЛОГ" на базе методологии БИИ и ЭС "АССИСТЕНТ", для определения состояния, динамики и ретроспективы развития водных экосистем и их компонентов в виде условных решений БИИ с обоснованием их качества и определением области нахождения действительного решения в рамках принятых ограничений;

6) ИТ БИИ в ЭС "АССИСТЕНТ-БИОСФЕРА" для контроля состояния и принятия управляющих экологических решений в задаче обеспечения устойчивого развития биосферных заповедников;

7) ИТ БИИ для поддержки принятия управленческих и ихтиологических решений "АССИСТЕНТ-ИХТИОЛОГ" в целях устойчивого развития промысловых популяций рыб Финского залива;

8) интеллектуальный информационно-измерительный комплекс в составе с передвижной экологической лабораторией и базовым экологическим центром для контроля состояния и прогнозирования экологических ситуаций в воздушной среде промышленного региона (г. Макеевка), а также для принятия эколого-экономических решений, позволяющий определить распределение концентраций примесей в воздушной среде, выявить возможные источники загрязнений и синтезировать оптимальную методику измерений;

9) реализованная и внедренная в практику деятельности природоохранных организаций и управлений охотничьих хозяйств ЭС "АССИСТЕНТ-БИОЛОГ", имеющая средства ее развития на основе методологии БИИ; конкретные структуры баз знаний, моделей и данных для популяций диких животных; аналитические модели динамики развития популяций кабана, лося и некоторых видов рыб для Ленинградской области и Удмуртской республики, средствами которых получены выводы и рекомендации по устойчивому развитию указанных популяций.

Реализация результатов работы состоит в создании и внедрении под руководством и при непосредственном участии автора:

- ЭС "АССИСТЕНТ" на предприятии "Севзапривод", г.Санкт-Петербург; в организации "Удмуртгеология";

- ЭС "АССИСТЕНТ-ИХТИОЛОГ" контроля состояния промысловых видов рыб на Нижнекамском и Воткинском водохранилищах в рыб-инспекции и в промысловой организации Удмуртской республики, г.Ижевск;

- ЭС "АССИСТЕНТ-БИОЛОГ" изучения и контроля состояния популяций лося, кабана и оленя в Центральной научно-исследовательской лаборатории Охотничьего хозяйства, г.Москва; в Управлении охотничьего хозяйства при Совете Министров Удмуртской республики, г.Ижевск; в Комитете Охотничьего хозяйства Ленинградской области, г. С.-Петербург;

- ЭС "АССИСТЕНТ-ЭКОЛОГ" и интеллектуальный измерительный комплекс для оценки, контроля состояния воздушной среды г.Мажевки Донецкой области, позволяющий осуществлять принятие оптимальных эколого-экономических решений;

- ЭС "АССИСТЕНТ- ЭКОСИСТЕМА" для ландшафтного мониторинга, используемая в научных и учебных целях в Ижевском государственном техническом университете;

- ЭС "АССИСТЕНТ-ГИДРОЛОГ" для контроля и изучения состояния гидрологических, гидробиотических и социально-экономических факторов экосистемы восточной части Финского залива в организации "Севзапривод", г.Санкт-Петербург.

Суммарный экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы составил более трех миллионов рублей в ценах 1993 г.. Системы экспонировались на международных и региональных выставках, симпозиумах и совещаниях, а также на Всемирном Форуме в г. Манчестере "Города и устойчивое развитие" в 1994 г.

Диссертационная работа выполнялась в рамках координационного плана научно-исследовательских работ АН СССР по проблеме "Техническая кибернетика", комплексной территориально-отраслевой программы "Интенсификация-90", государственной научной программы "Экологическая безопасность России", а также в рамках 9 госбюджетных и хозяйственных НИР, выполненных под руководством и при непосредственном участии автора.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались в период с 1978 по 1995 г.г. на 12 международных конференциях и симпозиумах, а также на 23 всесоюзных, всероссийских, республиканских и краевых конференциях, совещаниях и семинарах в отраслевых институтах и вузах.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 53 работы, включая 1 монографию, 1 препринт АН СССР и 35 статей в центральных изданиях, межотраслевых и межвузовских сборниках научных трудов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы из 360 наименований и приложения. Основная часть работы изложена на 297 стр. машинописного текста. Работа содержит 73 рисунка и 5 приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе работы на основании определения современных задач и тенденций развития методической и технической баз измерительной техники выделено направление интеллектуализации измерений, под которым понимается автоматизированное или автоматическое получение, обобщение и использование в измерительном процессе метрологически обоснованных знаний об ОИ и ВФ с целью его оптимизации и повышения качества результатов измерений. Основанием этому послужила произведенная в работе типизация современных измерительных задач по признакам типов цели, объекта измерения и измерительных ситуаций, которая позволила выделить класс задач интеллектуализации измерений (ИИ), характеризуемый значительной априорной неопределенностью знаний об ОИ и ВФ среды его функционирования в условиях взаимовлияния и развития их свойств. Изучение методологических и информационных характеристик задач мониторинга сложных природных и технических объектов (процессов и систем), общих свойств реальных сложных объектов, а также сопоставление их с соответствующими характеристиками задач ИИ и современными требованиями, предъявляемыми к методам и средствам мониторинга (учета разнородной качественной и количественной априорной информации об ОИ и ВФ, метрологического обоснования результатов, представляемых в зависимости от цели мониторинга в формах значений параметров, аналитических выражений, контрольных

выводов и управляющих рекомендаций, оптимальной организации мониторинга в целях обеспечения требуемого качества результатов и других) дало основание отнести измерительные задачи мониторинга СО к классу задач ИИ. Проведенный с позиций основных требований ИИ обзор методологических, информационных и технических аспектов современных информационно-измерительных систем показал необходимость создания методов и средств ИИ в задачах мониторинга СО, отвечающих поставленным требованиям.

В последующих разделах первой главы разработана концепция ИИ в задачах мониторинга СО, основывающаяся на байесовском подходе, получившая название байесовской интеллектуализации измерений (БИИ). Выбор байесовского подхода обусловлен его преимуществами при измерительной ситуации, характерной для задач ИИ, а именно:

- принципиальной возможностью получения байесовских решений на основе учета априорной и текущей объективной и субъективной информации;

- свойством внутреннего единства методологии, что делает подход универсальным для применений на всех этапах подготовки и реализации измерительного процесса и позволяет строить соответствующие шкалы ИИ иерархической структуры на единой принципиальной основе, обеспечивающей формализованную связь всех этапов ИИ, системность и комплексность их результатов;

- максимальной объективностью и полнотой решений, что важно для интерпретации результатов в условиях нечеткой и неточной информации об ОИ и ВФ;

- последовательным накоплением и коррекцией знаний об объекте изучения, что позволяет реализовать основную функцию ИИ познания объекта и создает основу для самообучения средств ИИ;

- принципиальной возможностью непрерывного уточнения результатов в процессе длительного изучения объекта, характерного для задач мониторинга СО, так как по мере накопления знаний байесовские решения концентрируются вокруг истинного решения (данное положение вполне согласуется с принципом теории измерений о возможности постоянного увеличения точности измерений);

- возможностью перспективного и ретроспективного изучения свойств объекта на основе индуктивной логики, что особенно важно для получения объективных и достоверных прогнозов и восстановле-

ния истории развития объекта;

- эффективностью (в связи с предыдущими свойствами) подхода для реализации его средствами новых измерительных технологий на основе средств получения и обобщения знаний, в частности, в виде экспертных систем и интеллектуальных измерительных комплексов.

Созданная концепция ЕИИ основана на известном понятии СО, как объекта сформированного в результате агрегации его элементов, в качестве которых выступают объекты минимальной структурной сложности, декомпозиция которых нецелесообразна или невозможна при конкретных целях и условиях измерительной задачи.

С позиций ИИ сформулированы требования, которым должна отвечать модель СО, адекватно отражающая его свойства в их развитии и взаимодействии с окружающей средой.

Предложены концепция и формальная запись абстрактной модели СО с динамическими ограничениями (МДО) в виде композиции (*) реляционных систем контролируемых свойств самого СО ($G_{н,1}$), ВФ ($G_{е,1}$) и используемых при синтезе модели ограничений ($G_{о,1}$) мерности пространств свойств СО и факторов СФ в момент времени $t=t_1$ ($l=2, T$, где T - период времени мониторинга или измерений):

$$G_1 = G_{н,1} * G_{е,1} * G_{о,1} \quad | \quad t=t_1. \quad (1)$$

В концепции модели предусмотрена возможность ее развития при получении новых знаний о СО и ВФ, которая при накоплении информации реализуется путем перевода ряда свойств СО и СФ из системы ограничений в систему контролируемых, что обеспечивает адекватность отображения эволюции свойств объекта в процессе его функционирования и мониторинга и служит принципиальной основой для его познания.

На основании предложенной концепции модели СО разработана концептуальная абстрактная модель ОИ в задачах ИИ в виде:

$$G_{у,1} = G_1 * G_{с,1} * G_{1-1} \quad | \quad t=t_1, \quad (2)$$

которая представляет собой композицию реляционных систем СО, СФ и средства измерений (СИ) $G_{с,1}$ и отражает эволюцию этих объектов в процессе измерений, что позволяет реализовать познавательную функцию СИ, оптимизировать измерительный эксперимент и повысить качество результатов измерений. Предложенная модель ОИ обладает свойством развития своей структуры в процессе измерений, что да-

ет принципиальную возможность реализации на ее основе развивающихся алгоритмов и информационных технологий.

Реализация концепции ОИ вида (2) в измерительном процессе возможна при наличии измерительных шкал, обладающих необходимыми свойствами для отражения свойств такой модели. С целью определения типа измерительной шкалы, соответствующей сформулированным в главе 1 требованиям, предъявляемым моделью ОИ вида (2), произведен обзор известных концепций измерительных шкал. Результаты обзора показали необходимость разработки нового типа измерительной шкалы, способной к развитию структуры носителя и системы отношений, реализуемых на нем в процессе измерений и познания свойств ОИ. В главе 1 разработаны концепция и принципиальная основа измерительной шкалы с динамическими ограничениями (ИДО) в виде реляционной системы G_s , являющейся подсистемой или фрагментом систем G_n и G_u и при определенных условиях измерительного эксперимента адекватно отражающей свойства ИДО СО и ОИ вида (2):

$$G_{s,j} = \langle \{Q_{i,j}\}; \{W_{j,j}\} \rangle = G_{u,j} * G_{u,j-1} (y_j; y_{j-1}), \quad (3)$$

где $\{Q_{i,j}\}, (i=1, I_{Q,j}), \{W_{j,j}\}, (j=1, J_{W,j})$ - совокупность свойств и отношений шкалы, y_j - совокупность условий измерений, включающих множества априорной информации $\{A_{i,j}\}, (i=1, I_{A,j})$, метрологических требований $\{Y_{i,j}\}, (i=1, I_{Y,j})$ и ограничений $\{Q_{i,j}\}, (i=1, I_{Q,j})$. В работе обоснован состав совокупности отношений $\{W_{j,j}\}$ для реализации концепции ИДО; и показано, что для реализации концепции ИДО система отношений $\{W_{j,j}\}$ должна включать отношения эквивалентности, порядка, функциональные (алгебраические), структуризации и обобщения свойств и диапазонов их значений.

Предложена обобщенная структура информационной технологии (ИТ) измерительного процесса в задачах мониторинга СО, позволяющая реализовать процесс ИИ на принципиальной основе ИДО в виде последовательности этапов: подготовки измерений, включающего формирование шкал ИИ в соответствии с условиями измерений (φ_1), синтеза алгоритма измерений (φ_2), оптимизации его параметров для достижения требуемого качества результатов (φ_3); реализации измерений и интерпретации результатов (φ_4); проверки адекватности и качества полученных результатов (φ_5), чему соответствует запись:

$$G_{H,L} = \{G_{S,1} * G_{X,1} * G_{F,1} \{(y_{S,1}; y_{X,1}; y_{F,1})\} * \{t_1\} \} \quad (4)$$

$$h_{1,1} \{MX\}_{1,1} = (h_{S,1} \{MX\}_{S,1}) * (h_{X,1} \{MX\}_{X,1}) * (h_{F,1} \{MX\}_{F,1}).$$

где $h_{1,1}$, $h_{S,1}$, $h_{X,1}$, $h_{F,1}$ - результаты реализации этапов ИИ; $\{MX\}_{1,1}$, $(t_1, 5)$ - комплексы метрологических характеристик результатов каждого из этапов соответственно; G_H , G_X , G_F - реляционные системы результатов измерений, данных и знаний.

Предложенная структура ИТ ИИ для мониторинга свойств СО обеспечивает эффективное решение задачи мониторинга СО в условиях неполной, неточной, разнородной информации об ОИ и ВД, значительной априорной неопределенности, а также метрологическое обоснование получаемых решений.

Формальная запись уравнения БИИ в оптимизационной форме имеет следующий вид:

$$\{h_{S,1} | \{MX_{S,1}\}\} = \underset{h_{S,1}; \varphi_{J,1}}{\operatorname{argmin}} C[\varphi_{J,1}((x_1 | h_{Z,1}; h_{F,1}; h_{Y,1}; h_{A,1}) | y_1)], \quad (5)$$

$$h_{S,1} \in H_{S,1}, \quad \varphi_{J,1} \in \Phi_{J,1}, \quad x_1 \in X_1.$$

где $h_{S,1}$ - список результатов ($S = \overline{1, S_1}$), достоверность каждого из которых определяется как апостериорная байесовская вероятность, отличная от нуля; $H_{S,1}$ - множество результатов БИИ, составляющих совокупность элементов носителя ИДО; $H_{Z,1}$, $H_{F,1}$, $H_{Y,1}$, $H_{A,1}$ - носители ИДО для параметров, функциональных зависимостей, систем взаимосвязанных параметров и (или) функциональных зависимостей, лингвистических переменных; C - интегральный байесовский критерий - оптимизирующее байесовское решающее правило (БРП) принятия решения по алгоритму $\varphi_{J,1}$ из множества алгоритмов $\Phi_{J,1}$ при наборе экспериментальных данных x_1 и условиях измерений y_1 .

В работе показано, что уравнение (5) является обобщением известных типов уравнений измерений и отражает дальнейшее развитие методических основ организации измерительных процессов в направлении обобщения, использования и получения различных по форме представления данных и знаний, то есть интеллектуализации измерений.

В качестве перспективных средств реализации ИТ БИИ выделены экспертные системы (ЭС), как системы, обеспечивающие получение решений на основе правил вывода и обобщения знаний. Однако, отмеченная необходимость метрологического обоснования получаемых

решений отсутствует в настоящее время в ЭС. Предложена абстрактная структура интеллектуальной ИИС для реализации задач мониторинга СО на основе ИТ ИИ.

Концепция БИИ рекомендована в качестве основы для решения задач мониторинга СО природной и искусственной среды на принципах измерительного подхода.

Во второй главе работы решаются методические вопросы организации БИИ.

При всех достоинствах байесовского подхода применить его в классическом виде или в виде известных модификаций в средствах ИИ не удастся в связи с рядом причин. Основная из них касается невозможности метрологического обоснования результатов байесовского оценивания. Хотя оптимальные байесовские правила получения решений и учитывают статистический характер данных, используемых при принятии решений, в виде вероятностной характеристики решения — его апостериорной байесовской вероятности, но, как известно, они не обеспечивают устойчивость получаемых решений в связи с тем, что в практических приложениях используются эмпирические или имитационные оценки вида априорного распределения решения или функции правдоподобия выборки, что вносит в результаты неконтролируемую дополнительную погрешность. Кроме того, точность оценивания контролируемого свойства также не определяется, ввиду отсутствия в известных алгоритмах метрического представления функционального пространства байесовских решений. Показатели этих погрешностей должны входить в комплексы метрологических характеристик (ИМХ) результатов байесовского оценивания. Таким образом, необходима модификация байесовского подхода в направлении обеспечения возможности полного метрологического обоснования решений, что позволит реализовать основные принципы измерительного подхода на основе байесовской идеологии.

Во второй главе разработаны основные принципы регуляризирующего байесовского подхода (РБП), позволяющие получать результаты интеллектуализации измерений в виде устойчивых оптимальных нечетких байесовских решений с метрологическим обоснованием их качества — значений показателей точности, надежности и достоверности. Концептуальную основу РБП составляют принципы байесовского подхода и оптимальных байесовских решений, реализованные на ИИДО в процессе БИИ.

В целях теоретического обоснования РБП доказана теорема о возможности реализации на компакте байесовских решений структуры ШДО БИИ в условиях заданных метрологических требований (Теорема 1). Условие реализации ШДО может быть записано в виде:

$$\forall (h_{s,1}; h_{(s+1),1}) \in H_{s,1}; \quad \rho(h_{s,1}; h_{s,(1+1)}) \leq \rho(\{M_{1,1}\}). \quad (6)$$

где ρ – расстояние между соседними элементами носителя ШДО;

Теорема 1 обобщена для ШДО иерархического типа. Разработаны принципиальные основы синтеза ШДО иерархического типа.

В работе доказана условная устойчивость решений БИИ на компакте ШДО при определенных метрологических требованиях и ограничениях. Это позволяет назвать методы БИИ и алгоритмы, построенные на их основе, регуляризирующими, а получаемые на ШДО решения – регуляризованными байесовскими оценками (р.б.о.). Сформулированы необходимые и достаточные условия реализации регуляризирующего алгоритма БИИ на основе заданных структуры ШДО БИИ и метрологических требований БИИ в виде:

$$\forall (h_{s,1}; h_{s+1,1}) \in H_{s,1}; \quad \forall y_1 \in Y_1; \quad (7)$$

$$\exists h_{s,1}^{(1)}: (r_{s,1}[(h_{s,1}^{(1)})|y_1|h_{s,1}]) = (r_{s+1,1}[(h_{s+1,1}^{(1)})|y_1|h_{s+1,1}]),$$

где $h_{s,1}^{(1)}$ – байесовская разделяющая граница;

$r_{s,1}$ – байесовский риск решения $h_{s,1}$.

Предложена концепция формирования априорного распределения количественной информации об ОИ и ОФ, обеспечивающая обобщение и использование количественной информации, поступающей от различных ее источников, и ее метрологическое обоснование.

Для привлечения в измерительный процесс качественной информации об ОИ и ОФ предложена концепция сопряженной с числовой (базовой) лингвистической шкалы БИИ и структура алгоритма лингвистических БИИ. Сформулированы условия, определяющие возможность синтеза сопряженной лингвистической ШДО и алгоритма БИИ в конкретной измерительной ситуации.

Для формализации и автоматизации БИИ на основании проведенного изучения свойств р.б.о. разработана структура комплекса метрологических характеристик результатов БИИ в виде:

$$\{MX\}_{s,1} = \{\xi_{s,1}; V_{s,1}; P_{s,1}\}, \quad (8)$$

в который входят показатели:

- точности:

$$\xi_{s,1} = \xi[\rho(\{M_{1,1}\})],$$

который является параметром регуляризации решений $\{h_{s,1}\}$ и характеризует потенциальную точность измерений на шкале $G_{s,1}$;

- надежности:

$$V_{s,1} = (1 - \alpha_{s,1}) \cdot (1 - \beta_{s,1}),$$

где $\alpha_{s,1}$ и $\beta_{s,1}$ - уровни ошибок первого и второго рода:

$$\alpha_{s,1} = \int_{h_{s+1,1}^{(r)}}^{h_{s+1,1}^{(r)}} f(h|h_{s,1}) dh; \quad \beta_{s,1} = \max_{h_{j,1} \in H_{s,1}} \int_{h_{s,1}^{(r)}}^{h_{s+1,1}^{(r)}} f(h|h_{j,1}) dh;$$

$f(h|h_{s,1})$ - плотность вероятности параметра h при условии гипотезы $h_{s,1}$ и достоверности, определяемой в виде апостериорной вероятности р.б.о.,

Для метрологического обоснования сложных свойств ОИ, определяемых на основании системы признаков, разработаны основные правила функциональных преобразований КМХ согласно структуре алгоритма БИИ. Разработаны основные принципы и формализованная основа оптимизации эксперимента БИИ в целях обеспечения установленных метрологических требований. Для конкретных видов функций правдоподобия выборки или функций распределения достаточных статистик получены формульные зависимости для определения оптимального объема выборочных данных, обеспечивающие заданные значения показателей точности и надежности решений БИИ.

Разработана обобщенная методология синтеза ШДО и алгоритмов БИИ, а также оптимизации измерительного эксперимента в целях обеспечения требуемого качества его результатов.

В третьей главе разработана методология параметрических статических и динамических БИИ, позволяющая получать метрологически обоснованные решения о значении параметров в числовой и лингвистической форме, учитывать априорную информацию о параметрах, оптимальным образом организовывать измерительный эксперимент для обеспечения метрологических требований, получать максимально полные, в виде списка возможных в условиях данного эксперимента, решения. Уравнение параметрической БИИ (ПБИИ) для статистик вероятностных характеристик СВ и СП имеет вид:

$$\{h_{s,1}^n, \{MX\}_{s,1}^n\} = \underset{h_{s,1}^n; \varphi_{j,1}^s; \varphi_{j,1}^r}{\operatorname{argmin}} C_{c,r}[\varphi_{j,1}^s, (\varphi_{j,1}^{c,r}, x_1) | Y_1]. \quad (9)$$

$$h_{s,1}^n \in H_{s,1}^n, \quad \varphi_{j,1}^s \in \Phi_{j,1}^s, \quad \varphi_{j,1}^{c\tau} \in \Phi_{j,1}^{c\tau},$$

где $\varphi_{j,1}^{c\tau}$ — алгоритм вычисления статистики по выборочным данным;
 $\varphi_{j,1}^s$ — алгоритм шкалирования статистики на ШДО БИИ.

Разработана методика синтеза алгоритмов, числовых и сопряженных лингвистических шкал БИИ статистик моментных характеристик и функций от них (коэффициентов асимметрии и эксцесса).

Создана методология синтеза обобщенных форм критериев проверки статистических гипотез. Разработаны алгоритмы, шкалы и методики проверки по обобщенным формам критериев Стьюдента, Фишера, χ^2 , позволяющие обеспечить требуемое качество проверки гипотез, производить проверку нечетких гипотез, определять расстояние от проверяемой гипотезы до действительного значения или модели ОИ, оптимизировать процесс проверки по обобщенным критериям. Показано, что существующие в статистической практике формы данных критериев являются вариантами обобщенных и неэффективными при измерительных ситуациях со значительной априорной неопределенностью знаний об ОИ и ВЭ и неполной, нечеткой, неточной поступающей информации.

Создана методика синтеза алгоритмов, базовых и сопряженных лингвистических шкал БИИ динамических параметров. Разработаны алгоритмы БИИ авторегрессии различных порядков, позволяющие оценивать коэффициенты авторегрессии и получать аналитические зависимости для авторегрессии и регрессии с обоснованием их качества в виде КМХ, содержащих показатели точности, надежности и достоверности решений.

Разработаны алгоритмы, шкалы для БИИ коэффициента корреляции, позволяющие обеспечить требования по метрологическому обоснованию значений коэффициента, получать интерпретированные решения в условиях априорной неопределенности на основе учета всего объема разнородной априорной информации.

Методология ПБИИ реализована в виде ИТ БИИ в прикладных ЭС мониторинга свойств, состояний и эволюции развития технических и природных объектов. В главах 5, 6, 7 работы приводятся конкретные примеры реализации ИТ ПБИИ в указанных выше задачах.

Четвертая глава посвящена вопросам создания шкал и методов БИИ характеристик и состояний систем взаимосвязанных СВ или СП.

Под функциональной БИИ (ФБИИ) понимается определение функ-

циональной зависимости, связывающей в аналитической форме два или более простых параметров, которые могут быть представлены в виде СВ или СП, на основе методологии РБП и соблюдения принципов измерительного подхода. Таким образом, результат ФБИИ может быть представлен в виде:

$$\{h_{s,1} | \{MX\}_{s,1}\} = \underset{h_{s,1}^H; h_{s,1}^n}{\operatorname{argmin}} C[\{\varphi_{j,1,b}^n(\varphi_{j,1}^H(x, Y_1))\} \{y_{1,b}^n\}]. \quad (10)$$

$$h_{s,1}^H \in H_{s,1}^H, \quad \varphi_{j,1}^H \in \Phi_{j,1}^H, \quad y_1^H < Y_L^H, \quad y_{1,b}^n < Y_{L,b}^n,$$

где $b = \overline{1, B_1}$ - число параметров функциональной зависимости, $\{MX\}_{s,1}^H$ - КМХ для этапа определения вида функциональной зависимости, и охарактеризован КМХ вида:

$$\{MX\}_{s,1} = \{MX\}_{s,1}^H * \underset{b=1}{\overset{B_1}{*}} \{MX\}_{s,b,1}^n; \quad (11)$$

где $\{MX\}_{s,b,1}^n$ - КМХ собственные для каждого b -го параметра.

Под системной БИИ (СБИИ) в данной работе понимается определение на основе методологии БИИ характеристик или состояния системы взаимосвязанных функциональных зависимостей, векторов параметров, других систем, входящих в данную.

Обобщенный результат системных БИИ может быть представлен в виде:

$$\{h_{s,1} | \{MX\}_{s,1}\} = \underset{h_{s,1}^C; h_{s,1}^H; h_{s,1}^n}{\operatorname{argmin}} C[\{\varphi_{j,1,\sigma}^n(\{\varphi_{j,1,\sigma}^H(\varphi_{j,1}^C(x, Y_1))\})\}]. \quad (12)$$

где $\sigma = \overline{1, g_1}$; g_1 - число функциональных зависимостей, входящих в систему.

КМХ, характеризующий качество результатов вида (10) имеет вид:

$$\{MX\}_{s,1} = \{MX\}_{s,1}^C * \left\{ \underset{\sigma=1}{\overset{g_1}{*}} \left\{ \{MX\}_{s,\sigma,1} * \left\{ \underset{b=1}{\overset{B_1}{*}} \{MX\}_{s,\sigma,b,1} \right\} \right\} \right\}. \quad (13)$$

Основное отличие от параметрических БИИ состоит в том, что пространство решений ФБИИ и СБИИ отличается сложностью своей структуры. Оно может быть представлено совокупностью вложенных друг в друга подпространств. Причем для ФБИИ существует всегда одно обобщающее пространство решений, содержащее в себе в качестве вложенных подпространств подпространства параметров, а при СБИИ таких пространств может быть множество, каждое из кото-

рых, может быть взаимосвязано с остальными по влиянию на его собственную структуру и форму и может быть независимым от остальных в рамках конкретных ограничений системы.

Очевидно, структура шкал ФБИИ и СБИИ должна отражать специфику их решений и иметь иерархическую структуру.

Если функциональная характеристика или системные параметры определяются по признакам, то иерархическая структура шкалы разбивается для включения в обобщенные пространства решений подпространств решений по отдельным признакам с учетом их взаимосвязи.

$$G_{s,1} = \sigma_1 \cdot I_{n(1)} * \left(*_{q=1}^{n-1} G_{s,1,1} | G_{s,1+1,1} \dots | G_{s,p,1} * G_{s,1-1} \right). \quad (14)$$

Таким образом, носитель такой шкалы представляет собой многомерную структуру согласно иерархии уровней измерительных процессов ФБИИ и СБИИ.

На этапе синтеза структуры многомерных шкал ФБИИ возникает вопрос измеримости функциональных пространств непараметрических решений, связанных с определением расстояний между отдельными элементами носителя таких шкал.

В качестве элемента носителя шкалы ФБИИ может выступать элемент функционального пространства, представляющий собой конкретный класс или вид аналитических зависимостей, определенных на $H_{F(1),1}$.

Для формирования носителя ШДО БИИ таких решений необходимо выполнение условий теоремы 1. Проверка свойств компактности функционального пространства необходима каждый раз при введении в класс ОИ БИИ новых видов функциональных пространств объектов и на каждом уровне иерархии ШДО ФБИИ или ШДО СБИИ.

Одним из сложных теоретических и практических вопросов является вопрос определения меры расстояния в функциональном пространстве решений ФБИИ и СБИИ. Отмечается, что в ряде задач практически удобным оказывается определение меры различия элементов в функциональном пространстве в смысле среднеквадратической характеристики, однако для полного метрологического обоснования необходимы более сильные метрики, такие как, например, равномерная.

Для сложных вероятностных функций эта метрика может быть определена в вероятностных пространствах.

Примером алгоритма ФБИИ является алгоритм БИИ ПВ одномерных

унимодальных законов распределения.

Одним из основных вопросов синтеза алгоритмов БИИ ПВ является вопрос выбора системы моделей ПВ, составляющих пространство решений алгоритма ФБИИ. Практика измерений показывает, что в большинстве задач оптимальной, с точки зрения простоты интерпретации и удобства дальнейшего использования, является система кривых плоскости Пирсона. Эта система моделей охватывает все разнообразие форм унимодальных и антимодальных распределений и является достаточно полной базой для ФБИИ ПВ.

Для построения ШДО БИИ ПВ производится дискретизация непрерывного функционального пространства ПВ в соответствии с условием:

$$\rho(f_{i,j}, (x_i; \{b_j\}_{i,j}); f_{(i+1),j}, (x_{i+1}; \{b_j\}_{(i+1),j})) \leq \rho(\epsilon_{\text{доп}}). \quad (15)$$

$f_{i,j}(x_i; \{b_j\}_{i,j})$ — модель ПВ в форме аналитического выражения, где расстояние определяется в равномерной метрике, которая, являясь наиболее сильной, обеспечивает соблюдение заданного расстояния и расстояния между интегральными законами распределения соответствующих ПВ. Специфика определения расстояния между ПВ, являющимися соседними элементами шкалы, состоит в том, что оно определяется в вероятностном пространстве, и для выявления различий по форме распределений в равномерной метрике должно быть устранено влияние параметров сдвига и масштаба. Однако, из-за коррелированности параметров сложных распределений этого достичь не удастся. В работе предложена и теоретически обоснована методика определения расстояния между ПВ сложных распределений через использование образцового распределения, которая позволяет обеспечить сравнение двух ПВ в равномерной метрике.

При организации ФБИИ ПВ основной вопрос состоит в выявлении формы ПВ, соответствующей экспериментальным данным. Характеристиками формы типовых распределений, входящих в систему Пирсона, являются коэффициенты асимметрии A_3 и эксцесса E_3 .

Шкала ФБИИ ПВ представляет собой иерархическую двухъярусную структуру вида:

$$G_{s,1}^{(f)} = (G_{s,1}^{(Ex)} | G_{s,1}^{(As)} * G_{s,1}^{(As)}) | y_1^{(f)}; \quad (15)$$

где $G_{s,1}^{(Ex)} | G_{s,1}^{(As)}$ — условная шкала БИИ эксцесса;

$G_{s,1}^{(As)}$ — шкала БИИ асимметрии.

Уравнение ФБИИ ПВ имеет вид:

$$\begin{aligned} \{f_{s,1}(x_1; \{b_j\}_{j=1,1}) | \{MX\}_{s,1}^{(f)}\} = \argmin_{h_{s,1}^{(n)}; \varphi_{j,1}^{(n)}} & \{ \varphi_{j,1}^{(n)}(x_1^{(n)} | y_1^{(n)}) | \\ & \argmin_{h_{s,1}^{(f)}; \varphi_{j,1}^{(f)}} \{ \varphi_{j,1}^{(f)}(x_1^{(f)} | y_1^{(f)}) \} \}. \quad (17) \\ h_{s,1}^{(n)} \in H_{s,1}^{(n)}; \quad \varphi_{j,1}^{(n)} \in \Phi_{j,1}^{(n)}; \quad h_{s,1}^{(f)} \in H_{s,1}^{(f)}; \quad \varphi_{j,1}^{(f)} \in \Phi_{j,1}^{(f)}, \end{aligned}$$

где $\varphi_{j,1}^{(f)}$ - алгоритм непараметрического определения вида ПВ, выявляющий ее форму; $H_{s,1}^{(f)}$ - область решений о виде аналитической зависимости ПВ; $\varphi_{j,1}^{(n)}$ - алгоритм параметрического оценивания ПВ, обеспечивающий определение параметров ПВ на основе ПБИИ; $H_{s,1}^{(n)}$ - область решений ПБИИ для параметров

КМХ для результата (17) формируется с учетом собственных КМХ параметров $\{MX\}_1^{(f)}$ и признаков формы ПВ $\{MX\}_1^{(As)}$, $\{MX\}_1^{(Ex)}$ в виде:

$$\{MX\}_1^{(f)} = \{MX\}_1^{(Ex)} | \{MX\}_1^{(As)} * \{MX\}_1^{(As)} * \left(\sum_{j=1}^B \{MX\}_{j,1}^{(b)} \right). \quad (18)$$

Таким образом алгоритм БИИ для плотности вероятности позволяет получать аналитическую зависимость для ПВ СВ или СП в форме типового распределения плоскости Пирсона с требуемыми точностью, надежностью и определять ее достоверность в условиях измерений. Исследованы дисперсии оценок асимметрии и эксцесса типовых распределений. Предложена формализованная методика решения обратной задачи БИИ ПВ, для чего исследованы выборочные дисперсии A_z и E_x , типовых распределений системы Пирсона, получены зависимости, позволяющие определять оптимальный объем выборочных данных для проведения БИИ ПВ с обеспечением заданных метрологических требований.

Проверка адекватности полученных моделей ПВ производится по обобщенному критерию χ^2 , обеспечивающему точность и надежность такого контроля.

Алгоритм ФБИИ ПВ нашел применение при решении задач определения законов распределений погрешностей средств измерений, показателей яркости изображений объектов на космических и аэрофотоснимках, гидрологических показателей акваторий, размерно-весовых характеристик особей популяций и других, где подтвердилось обеспечение требуемого качества и высокой скорости получения ре-

результатов. Особую роль играет этот алгоритм в ИТ БИИ при определении аналитического вида априорных распределений объектов БИИ и их метрологического обоснования.

Для оценки состояния и характеристик системы СВ и СП применяются базовые и сопряженные лингвистические шкалы состояний, позволяющие получить количественную и качественную оценку состояния СО в виде:

$$\{h_{s,1}^{(0)} | \{MX\}_{s,1}^{(0)}\} = \{h_{s,1}^{(A)} | \{MX\}_{s,1}^{(A)} | \{h_{s,1}^{(C)} | \{h_{s,1}^{(H)} | \{h_{s,1}^{(N)} | \{MX\}_{s,1}^{(N)} | \{MX\}_{s,1}^{(H)} | \{MX\}_{s,1}^{(C)}\}\}. \quad (19)$$

Закон распределения общей погрешности такого результата определяется в виде:

$$f(\Delta h_{s,1}^{(0)}) = f^A(\Delta h_{s,1}^{(A)}) \cdot f^C(\Delta h_{s,1}^{(C)}) (f(\Delta h_{s,1}^{(A)}) | h_{s,1} * f(\Delta h_{s,1}^{(C)}) | y_1 | y_1^{(A)}). \quad (20)$$

где $\Delta h_{s,1}^{(A)} | h_{s,1}$ - условная погрешность качественного решения, полученного на сопряженной лингвистической шкале СБИИ при условии, что интегральная характеристика погрешности количественного результата СБИИ равна $\Delta h_{s,1}$.

КМХ для результата БИИ (19) имеет вид:

$$\{MX\}_{s,1}^{(0)} = (\{MX\}_{s,1}^{(A)} | \{MX\}_{s,1} * \{MX\}_{s,1}^{(C)}) * \{MX\}_{s,1}^{(0)}. \quad (21)$$

Рассмотрена задача метрологического синтеза алгоритмов ФБИИ и СБИИ при заданных условиях измерений.

Алгоритмы и методы ФБИИ и СБИИ для вероятностных функциональных и системных характеристик приводятся в отдельных параграфах данной главы.

Разработана методика, структуры иерархической ИДО и алгоритма решения задачи ФБИИ многомодальной ПВ СВ или СП. Получены формулы для решения задачи определения оптимального объема данных для алгоритма в целом и отдельных его этапов.

Разработана методика построения гистограмм ПВ с требуемой точностью оценивания ПВ на основе методологии БИИ, что позволяет на формализованной основе производить выбор числа разрядов гистограммы и определять оптимальный объем выборочных данных при заданных метрологических требованиях БИИ для типовых распределений системы Пирсона.

Предложена концепция прогнозирования поведения и ретроспективного оценивания на основе БИИ, отличающаяся от существующих

обоснованием качества прогнозов и результатов ретроспективных решений в виде КМХ, позволяющая учесть всю имеющуюся информацию об ОИ и среде его функционирования, а также более точно определить достоверную область нахождения прогнозных и ретроспективных решений БИИ при неполной, неточной и нечеткой информации.

В пятой главе разработаны принципы синтеза информационных технологий мониторинга сложных объектов на основе БИИ, что позволяет представить процесс мониторинга как единый измерительный процесс с полным метрологическим обоснованием его этапов и решений в динамическом режиме функционирования с иерархической ШДО объекта в виде:

$$G_{S,1}^{(u)} = (G_{S,1}^{(Y)} * G_{S,1}^{(RP)} * G_{S,1}^{(O)} * G_{S,1} * G_{X,1} * G_{F,1}) * G_{S,1-1}^{(u)} | y_1. \quad (22)$$

где $G_{S,1}^{(Y)}$, $G_{S,1}^{(RP)}$, $G_{S,1}^{(O)}$ - реляционные системы ШДО БИИ генерации управляющих решений и рекомендаций, контрольных выводов, и определения свойств и состояний объектов БИИ.

Сформирована структура обобщенной ИТ БИИ и методика решения типовых задач БИИ (измерительного оценивания, контроля и управления на основе методологии БИИ) в различных условиях измерений.

Предложена и реализована структура ЭС статистического мониторинга свойства сложных объектов "АССИСТЕНТ", реализующая математическую среду БИИ и ИТ БИИ и позволяющая организовать и оптимизировать процесс мониторинга, а также обеспечить развитие ИТ БИИ и ЭС "АССИСТЕНТ" в различных условиях мониторинга.

Поставлена задача и предложена ИТ БИИ в задачах статистического управления технологическим процессом (СУТП) и производственным оборудованием (ПО). Рассмотрен пример применения ИТ БИИ в статистическом мониторинге задачи СУТП механической обработки деталей, что позволило повысить эффективность контроля и качество готовой продукции и оптимизировать систему СУТП и ПО, а также режим эксплуатации ПО.

Предложен подход к решению задачи метрологического мониторинга на основе ИТ БИИ, а также алгоритм БИИ характеристик СИ, обеспечивающий определение параметров и моделей метрологических характеристик СИ в реальных условиях его эксплуатации и взаимодействия с ОИ и ОЭ, позволяющий реализовывать процесс метрологического мониторинга эксплуатационных характеристик СИ, а также генерировать оптимальные методики поверки СИ на основе РМТ и созда-

вать развивающиеся ИТ и интеллектуальные средства метрологического мониторинга СИ.

Предложен подход к формированию ИТ и алгоритмов классификации объектов по изображениям и другой неточной или неполной информации, который апробирован в задаче классификации космических искусственных объектов по космическим фотоснимкам. Сформирована база знаний и ЭС "АССИСТЕНТ-КЛАСС" для мониторинга определенных классов космических объектов. Алгоритм классификации этих объектов на основе ИТ БИМ отличается высокой скоростью классификации и вероятностью правильной классификации.

В шестой главе разработаны методология и ИТ БИМ в задачах экосистемного мониторинга природных объектов.

Экосистемный (биогеоинформационный) мониторинг природной среды предполагает комплексные исследования состояния природных объектов, которые, являясь разнообразными по масштабам, физическим, географическим и биологическим свойствам, обладают некоторой общностью, состоящей в представлении этих объектов в виде живой сложной системы, активно взаимодействующей со средой своего окружения. Поэтому в постановке задач БИМ на основе методологии БИМ могут решаться как комплексные задачи экосистемных исследований, так и задачи оценок монофакторных исследований, составляющие предмет экологических или биологических видов мониторинга различных компонент экосистемы: воды, атмосферы, почвы, растительного и животного мира, климата или отдельных характеристик. Полями таких исследований могут быть: оценка современного или перспективного состояния экосистемы или ее отдельных компонент, структуризация и экологическое картографирование, определение динамики внутригодовых, многолетних и крупномасштабных показателей эволюции экосистем и входящих в них природных объектов, моделирование развития природных процессов и систем, прогнозирование экологических ситуаций, экологическое нормирование, планирование развития регионов с учетом их социально-экономического и природного потенциала, оптимизация природопользовательской и природоохранной деятельности в целях устойчивого развития экосистем, включая и их социально-экономические компоненты.

Очевидно, все эти задачи могут быть разделены на три основные группы:

- оценивание свойств и характеристик экосистемы и ее компо-

мент, а также моделирование их эволюции, восстановление ретроспективы развития и прогнозирование состояний и ситуаций;

- контроль и нормирование состояния экосистем или их характеристик;

- генерация оптимальных экологических решений и управляющих рекомендаций.

В главе разработана концепция ИТ БИИ в задачах экосистемного мониторинга при определении основных характеристик, состояний и эволюции экосистем и их компонент, содержащая принципиальную основу для реализации РБП в задачах оценивания, экологического контроля и нормирования, а также выработки управляющих рекомендаций, что позволяет производить метрологическое обоснование получаемых результатов, планировать стратегию мониторинга для обеспечения требуемого качества получаемых решений, учитывать в процессе БИИ разнородную априорную информацию об ОИ и ВЭ экосистемы, получать достоверные решения при неполной, неточной, нечеткой информации.

МДО экосистемы может быть записана в виде композиции структурной $G_{s,1}^{(c)}$ и топографической $G_{s,1}^{(T)}$ моделей экосистемы:

$$G_{s,1}^{(3)} = (G_{s,1}^{(c)} | G_{s,1}^{(T)} * G_{s,1}^{(T)}) * G_{s,1-1}^{(3)} | y_1; \quad (23)$$

с КМХ вида:

$$\{MX\}_{s,1}^{(3)} = \{MX\}_{s,1}^{(c)} * \{MX\}_{s,1}^{(T)} * \{MX\}_{s,1-1}^{(3)}. \quad (24)$$

Модель вида (23) может быть использована как для прогнозирования состояния экосистемы (при времени прогноза $t > t_L$), так и для восстановления ретроспективы развития экосистемы, ее исторического прошлого ($t < t_1$).

Предложены конкретные модели вида МДО природных объектов в задачах экологического мониторинга водной, воздушной сред и ландшафтов, позволяющие реализовать развивающиеся ИТ БИИ, обеспечивающие повышение качества получаемых результатов и эффективность решения основных задач мониторинга.

Разработаны и реализованы в прикладных ЭС структуры базовых и сопряженных лингвистических МДО БИИ при определении значений, аналитических зависимостей, контролирующих и управляющих решений для основных характеристик водной и воздушной сред конкретных экосистем Ленинградской и Донецкой областей, а также конкретные ИТ БИИ, обеспечивающие требуемое качество результатов в условиях

значительной априорной неопределенности и получение устойчивых региональных моделей характеристик экосистем для задач контроля состояния природных объектов и экологических ситуаций, оптимального регионального управления природными ресурсами.

Разработаны и внедрены в практику деятельности экологических организаций конкретные структуры экспертных систем и ИИС, на базе прикладных ИТ БИИ в виде систем "АССИСТЕНТ-ГИДРОЛОГ" для оценки состояния и эволюции водной экосистемы Финского залива и ИИС для контроля состояния воздушной среды г.Магистры Донецкой области, получившая сертификат качества РФ.

Получены конкретные модели динамики параметров и законов распределения значений компонент водной и воздушной сред указанных регионов. Разработаны и наполнены информацией базы данных и знаний для водной экосистемы восточной части Финского залива и 28 типов ландшафтных компонентов экосистем России.

В седьмой главе разработана концепция биосферного мониторинга на основе ИТ БИИ, позволяющая получить достоверные, полные и объективные решения БИИ относительно основных показателей и состояния популяций живых организмов биосферы, а также основные и альтернативные оценки экологических ситуаций с учетом информации о влияющих природных и антропогенных факторах экосистемы.

Разработаны концепции, модели, алгоритмы и методики для определения основных показателей состояния популяций копытных животных и рыб, обеспечивающие получение результатов с обоснованием их качества в виде показателей точности, надежности и достоверности, что позволило использовать их в практической деятельности экологических организаций и повысить эффективность природоохранной и природопользовательской деятельности оптимизировать управление биоресурсами по ряду показателей.

Основное уравнение БИИ для определения состояния популяции $h_{s,1}^{(a)}$ или его показателя с учетом состояния среды обитания $h_{s,1}^{(E)}$ и антропогенных факторов $h_{s,1}^{(a)}$ имеет вид:

$$\{h_{s,1}^{(a)} | \{MX\}_{s,1}^{(a)}\} = \arg \min_{h_{s,1}^{(a)}; \varphi_{j,1}^{(a)}} C[\varphi_{j,1}^{(a)}(x_1 | h_{j,1}^{(E)}; h_{j,1}^{(a)}; Y_1)]. \quad (25)$$

$$h_{s,1}^{(a)} \in H_{s,1}^{(a)}; \varphi_{j,1}^{(a)} \in \Phi_{j(1),1}^{(a)}; h_{j,1}^{(E)} \in H_{j(1),1}^{(E)}; h_{j,1}^{(a)} \in H_{j,1}^{(a)}.$$

Разработаны структуры базовых и сопряженных лингвистических шкал БИИ для конкретных популяций животных Ленинградской области

и Удмуртии, позволяющие обобщать разнородную архивную и текущую информацию о состоянии популяции и среды ее обитания для повышения качества решений задач оценивания, контроля, нормирования, квотирования и управления в биосферном мониторинге. Использование ИТ БИИ позволило уменьшить погрешности в определении численности стада лося и уточнить результат в 1,5 раза. ИТ БИИ использовалась при прогнозировании численности популяций кабана и лося на территориях Ленинградской области и Удмуртии, результаты которого полностью подтвердились в последующие периоды. Согласно рекомендациям, полученным средствами БИИ (ЭС "АССИСТЕНТ-БИОЛОГ"), число выдаваемых лицензий в Удмуртии уменьшено в 1,7 раза, что позволило стабилизировать состояние популяции лося в республике.

Разработаны и внедрены в практику экологических организаций ЭС "АССИСТЕНТ-БИОЛОГ" и "АССИСТЕНТ-ИХТИОЛОГ" для принятия управленческих и экологических решений, моделирования и непрерывного изучения биосферы и ее основных компонентов (популяций животного мира), ведения кадастров природных объектов и систем на локальном, региональном и федеральном уровнях.

Созданы базы данных и знаний для популяций животного мира Ленинградской области и Удмуртии, получены конкретные результаты (значения показателей, модели их динамики, законы распределения, решения о состоянии популяций и влияющих факторов среды их обитания), используемые в настоящее время для принятия оптимальных управляющих решений в охране окружающей среды, контроля биоразнообразия и устойчивого развития региональных экосистем.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В работе получены следующие основные научные и практические результаты:

1. На основании исследований современных тенденций развития измерительной техники и новых измерительных задач выделен класс задач интеллектуализации измерений, характеризуемый измерительной ситуацией со значительной априорной неопределенностью знаний об объекте измерения. Показано, что задача мониторинга сложных технических и природных систем, активно взаимодействующих с окружающей средой в процессе их функционирования и эволюции, может быть поставлена как задача интеллектуализации измерений. Опреде-

лены требования к информационным технологиям и средствам измерений для реализации интеллектуализации измерительных процессов.

2. Разработана концепция, получено основное уравнение интеллектуализации измерительных процессов на основе байесовского подхода (БИИ), в результате изучения свойств сложных объектов предложена модель сложного объекта измерений с динамическими ограничениями (МДО), адекватно отражающая свойства сложных технических и природных систем и позволяющая обеспечить непрерывное познание свойств сложного объекта в процессе измерений. Предложена концепция и обобщенная структура измерительной шкалы с динамическими ограничениями для реализации МДО в измерительных системах.

3. Разработан регуляризирующий байесовский подход, позволяющий синтезировать алгоритмы БИИ с устойчивыми, полными, метрологически обоснованными решениями, получаемыми на основании учета всего объема априорной и поступающей в процессе измерений информации, что повышает качество результатов БИИ и дает возможность оптимизировать измерительные процессы в целях обеспечения требуемого качества результатов измерений.

4. Разработаны принципы, определены необходимые и достаточные условия синтеза базовой числовой и сопряженной лингвистической шкал, методов и алгоритмов БИИ на основе РБП, реализующие методологию БИИ и обеспечивающие решение измерительных задач оценивания, контроля и управления в условиях значительной априорной неопределенности с требуемым качеством результатов решений и учетом информации, представленной в различных формах.

5. Предложена структура комплексов метрологических характеристик результатов БИИ, включающая показатели точности, надежности и байесовской достоверности решений, а также способы их функциональных преобразований, что позволяет контролировать дополнительно к существующим, составляющие погрешности условной неадекватности, устойчивость и байесовскую достоверность результатов измерений.

6. Предложена принципиальная основа параметрической БИИ, позволяющая синтезировать алгоритмы БИИ параметрических статистик, обеспечивающая требуемое качество определения их значений в условиях значительной априорной неопределенности и неполноты, неточности и нечеткости поступающей информации. Разработаны и

реализованы алгоритмы ПБИИ для статистик моментных характеристик, коэффициентов асимметрии, эксцесса и коэффициента корреляции.

7. Разработана методика синтеза алгоритмов ПБИИ для критериев проверки статистических гипотез, позволяющая получать обобщенные формы критериев, обеспечивающие требуемое качество решений и оптимизацию алгоритма проверки, определение расстояния между проверяемыми гипотезами, проверку нечетких гипотез на основе всего объема априорной и поступающей информации. Разработаны алгоритмы ПБИИ статистик критериев Стьюдента, Фишера и χ^2 -критерия.

8. Разработаны принципы оптимального синтеза алгоритмов БИИ для определения функциональных зависимостей и характеристик систем в условиях значительной априорной неопределенности, обеспечивающих метрологическое обоснование и требуемое качество результатов. Реализованы алгоритмы БИИ для одномерных, многомерных и многомерных законов распределений СВ и нестационарных СП, которые позволяют получать результаты в виде списка возможных моделей, представленных в аналитической формах типовых уни-модальных распределений плоскости Пирсона и их смесей с полным метрологическим обоснованием результатов, а также алгоритмы БИИ характеристик систем СВ и СП.

9. Предложены информационные технологии решения трех типов задач БИИ: измерительного оценивания, измерительного контроля и измерительного управления объектом и измерительным экспериментом в процессе функционирования СО. Предложены конкретные ИТ мониторинга сложных технических объектов и процессов с использованием системы статистического мониторинга БИИ в задачах статистического управления технологическим процессом механической обработки деталей, метрологической аттестации СИ, классификации и мониторинга состояния технического объекта по изображениям, позволяющие получать метрологически обоснованные, устойчивые и полные решения, а также оптимизировать процесс мониторинга этих объектов.

10. Разработана, реализована и внедрена в измерительную практику структура ЭС "АССИСТЕНТ", реализующая ИТ БИИ в задачах статистического мониторинга СО на основе РБП.

11. Предложена концепция ИТ БИИ в задачах экосистемного мониторинга на основе методов БИИ, позволяющая непрерывно изучать

экосистему и ее основные компоненты, получать объективную и полную характеристику свойств экосистемы в условиях текущих ограничений, а также оценку качества полученных решений, прогнозировать, контролировать и восстанавливать состояния экосистемы и ее компонентов, получать эффективные природоохранные решения и оптимизировать процесс изучения на основе оптимизации БИМ. Построены и внедрены в практику деятельности экологических организаций прикладные ЭС и реализующие методологию, алгоритмы и ИТ БИМ, для мониторинга гидро-, аэро- и биосферы, позволяющие создавать развивающиеся системы мониторинга этих компонентов природной среды, обеспечивать получение метрологически обоснованных экологических решений и управляющих рекомендаций.

12. Получены новые модели и решения, созданы базы данных и знаний для различных компонентов природной среды, позволяющие получать интегральные решения о состоянии и динамике развития природных объектов, повысить эффективность и качество природоохранных и природопользовательских решений.

Таким образом, в результате выполненных научных исследований осуществлено теоретическое обобщение и решение крупной научной проблемы, состоящей в разработке методов и средств интеллектуализации измерительных процессов в задачах мониторинга сложных технических и природных объектов в сложных измерительных ситуациях, что обеспечивает повышение качества получаемых результатов и эффективности измерительного эксперимента, развитие ИТ измерений на основе непрерывного познания объекта мониторинга, что имеет важное народно-хозяйственное значение.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Недосекин Д.Д., Прокопчина С.В., Чернявский Е.А. Информационные технологии интеллектуализации измерительных процессов. - СПб.: Энергоатомиздат, 1995.- 185 с.
2. Койнаш Б.В., Прокопчина С.В. Регуляризирующий байесовский подход в задачах классификации объектов по изображениям. - Препринт АН СССР, ИПА, Л., 1991.- 61с.
3. Недосекин Д.Д., Прокопчина С.В. Об одном подходе к выбору типа распределения для выборок большого объема. - В сб. науч. тр. "Устройства и системы автоматизированной обработки информа-

ции". - Пенза: ППИ, 1976, с. 54-56.

4. Недосекин Д.Д., Прокопчина С.В. О возможном методе автоматизации выбора модели закона распределения случайного процесса. - Тез. докл. V Всесоюзной конференции "Планирование и автоматизация эксперимента в научных исследованиях". - М., 1976, с.113-114.

5. Прокопчина С.В. Выбор шага квантования по уровню равномерно распределенного сигнала. // Известия ЛЭТИ: Сб. научн. тр. - Л.: ЛЭТИ, 1976, вып. 184, с. 92-96.

6. Недосекин Д.Д., Прокопчина С.В. Многофункциональное комбинированное вычислительное устройство для определения законов распределения случайных процессов. - В сб. "Проблемы создания преобразователей формы информации", ч.2. - Киев: Наукова думка, 1976, с. 193-196.

7. Недосекин Д.Д., Прокопчина С.В. Вопросы построения гибридного вычислительного комплекса для определения законов распределения. - В сб. "Гибридные вычислительные машины и комплексы". - Киев: Наукова думка, 1976, с. 110.

8. Прокопчина С.В. К расчету погрешности аппроксимации сложных распределений, обладающих параметрами формы, нормальным. // Известия ЛЭТИ: Сб. научн. тр. - Л.: ЛЭТИ, 1977, вып.209, с. 44-48.

9. Прокопчина С.В. Идентификация распределений признаков текстурных изображений с заданными точностью и надежностью. - Тез. докл. II Всесоюзной конференции "Автоматизированные системы обработки изображений (АСОИЗ-86)". - М.: Наука, 1986. - с. 302-303.

10. Прокопчина С.В., Рубинштейн Ю.Г., Липовецкий Ю.М. Пакет прикладных программ идентификации ПВ для задач статистического описания текстурных изображений. - Тез. докл. Респуб. научн.-техн. конф. - Ижевск, 1987, с. 334-335.

11. Чернявский Е.А., Недосекин Д.Д., Прокопчина С.В. Критерий оценки адекватности результатов имитационного моделирования сложных систем и процессов. - В межвузовском сб. науч. тр. "Цифровые модели в проектировании и производстве РЭС". Вып.2. - Пенза: ППИ, 1990, с. 77-81.

12. Прокопчина С.В. Метрологическая аттестация моделей и алгоритмов байесовской идентификации вероятностных характеристик. - В сб. тез. докл. III Всесоюзн. конф. "Метрологическое обеспечение ИИС и АСУТП", 3-5 октября 1990, Львов, с.24-25.

13. Прокопчина С.В., Наугольников О.А. Байесовские интеллектуальные измерения параметров случайных процессов. // Известия ЛЭТИ: Сб. науч. тр. - Л.: ЛЭТИ, 1991, вып. 442, с. 73-76.

14. Недосекин Д.Д., Наугольников О.А., Прокопчина С.В. Идентификация законов распределений средствами экспертной системы "АССИСТЕНТ-СТАТ". - Тез. докл. Всес. науч.-техн. семинара "Статистическая идентификация, прогнозирование и контроль". - Севастополь, 1991, с. 68-69.

15. Недосекин Д.Д., Прокопчина С.В. Метрологическое обеспечение моделей и алгоритмов байесовской идентификации вероятностных характеристик. ДР 5014-пр91. - Деп. в ВИНТИ "Депонированные научные работы", 1991, № 11. - 49 с.

16. Недосекин Д.Д., Прокопчина С.В., Наугольников О.А. Параметрическая идентификация процессов и систем на основе регуляризирующего байесовского подхода. - Тез. докл. Всес. научн. конф. "Идентификация, измерение характеристик и имитация случайных сигналов", Новосибирск, 1991, с. 62-63.

17. Прокопчина С.В. Классификация объектов по их изображениям на основе регуляризирующего байесовского подхода. - Тез. докл. Всес. научн. конф. "Идентификация, измерение характеристик и имитация случайных сигналов", Новосибирск, 1991, с. 85-86.

18. Недосекин Д.Д., Прокопчина С.В. Параллельные вычисления в алгоритмах байесовской идентификации. // Тез. докл. Всес. семинара "Распределенная обработка информации - IV", Новосибирск, 1991, с. 32.

19. Прокопчина С.В. Интеллектуальные байесовские измерения вероятностных характеристик процессов и систем. - В сб. тез. докл. Всесоюзн. науч.-техн. конф. "ИИС-91", С.-Петербург, 1991, с. 40-41.

20. Чернявский Е.А., Недосекин Д.Д., Прокопчина С.В., Койнаш Б.В. Обеспечение требуемого качества решений в байесовских алгоритмах классификации объектов по изображениям. // Тез. докл. конф. "Проблемы создания, систем обработки, анализа и понимания изображений", Ташкент, 1991, с. 128-129.

21. Прокопчина С.В. Выбор параметров гистограммы для оценивания плотности вероятности унимодальных распределений с заданной точностью. - Методы вычислительного эксперимента в вычислительной практике. - Сб. научн. тр., вып. 1, Ижевск, 1992, с. 59-62.

22. Наугольников О.А., Прокопчина С.В. Байесовская идентификация параметров распределений. // Известия ЛЭТИ: Сб. научн. тр. - Л.: ЛЭТИ, 1992, вып. 446, с. 57-61.

23. Прокопчина С.В., Рубинштейн Ю.Г. Определение дисперсии выборочных коэффициентов асимметрии и эксцесса. - Методы вычислительного эксперимента в вычислительной практике. - Сб. научн. тр. - Ижевск: ИМИ, 1992, вып. 1, с. 62-67.

24. Прокопчина С.В. Оценка погрешности квантования по уровню при определении статистических характеристик сигналов. // Методы вычислительного эксперимента в инженерной практике: Сб. науч. тр. - Ижевск: ИМИ, 1992, вып. 2, с. 116-125.

25. Прокопчина С.В. Экспертная система АССИСТЕНТ для интеллектуальных байесовских измерений вероятностных характеристик. // Измерительная техника, 1992, №8, с. 11-14.

26. Прокопчина С.В., Рубинштейн Ю.Г. Применение регуляризирующего байесовского подхода к подсчету численности биоресурсов лоса. - Деп. в ВИНТИ "Депонированные рукописи", 1992, №10, б/о 172, 12 с.; № 2032-92 от 23.06.92.

27. Прокопчина С.В., Наугольников О.А., Рубинштейн Ю.Г. Экспертные системы интеллектуальных измерений в задачах экологического мониторинга. - Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. "Микроэлектроника и информатика". - М., 1993, с. 122-124.

28. Прокопчина С.В., Недосекин Д.Д. Метрологические аспекты интеллектуальных измерений. - Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. "Микроэлектроника и информатика". - М., 1993, с. 119-122.

29. Прокопчина С.В. Биосферный мониторинг на основе новых информационных технологий байесовских интеллектуальных измерений. - Тез. докл. междунар. конф. "Мониторинг суши и водных экосистем", С.-Петербург, 1994, с. 225.

30. Прокопчина С.В., Наугольников О.А., Лапшин М.В. Адаптивный алгоритм контроля качества на основе регуляризирующего байесовского подхода. - Тезисы докл. науч. конф. "Состояния и проблемы технических измерений", М., 1994. - с. 90-91

31. Прокопчина С.В., Строев Р.П., Домченко А.М. Метрологическое обоснование алгоритмов байесовских интеллектуальных измерений показателей состояния биоресурсов. - Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. "Идентификация, измерение характеристик и имитация случайных сигналов", Новосибирск, 1994, с. 118-119.

32. Прокопчина С.В. Байесовские интеллектуальные измерения статистических характеристик случайных величин и процессов.- Тез. докл. межд. науч.-техн. конф. "Идентификация, измерение характеристик и имитация случайных сигналов", Новосибирск, 1994, с.34.

33. Рубинштейн Ю.Г., Прокопчина С.В. Прогнозирование объема возможной добычи биоресурсов методом байесовской идентификации распределений.//Известия ГЭТУ: Сб. научн. тр.- СПб.: ГЭТУ, 1994, вып. 469, с. 9-22.

34. Недосекин Д.Д., Прокопчина С.В., Чернявский Е.А. Регуляризирующий байесовский подход в задачах интеллектуальных измерений.// Известия ГЭТУ: Сб. научн. тр. - СПб.: ГЭТУ, 1994, вып. 469, с. 70-76.

35. Прокопчина С.В. и др. Определение состояния кабана на территории Ленинградской области средствами интеллектуальных измерений.- СПб.: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, 1995. - 35 с. - Деп. в ВИНТИ 28.07.95, №2324-B95.

36. Прокопчина С.В. и др. Регуляризирующий байесовский подход к определению состояния лося на территории Ленинградской области.- СПб.: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, 1995. - 30 с. - Деп. в ВИНТИ 28.07.95, №2325-B95.

Подписано в печать 02.10.95 Формат 60*84/16
Печать офсетная. Заказ № 153
Печатный лист 2,0 Тираж 100 экз.

Ротапринт МП "Поликом"
197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5