

Девятков Владимир Васильевич

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ
ИМИТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
СЛОЖНЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

08.00.13 – Математические и инструментальные методы экономики

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени доктора экономических наук

Москва
2015

Работа выполнена на кафедре «Системный анализ и моделирование экономических процессов» ФГОБУВПО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации»

Научный консультант: доктор экономических наук, профессор
Кобелев Николай Борисович

Официальные
оппоненты: **Лихтенштейн Владимир Ефραίимович**
доктор экономических наук, профессор,
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский
институт проблем вычислительной техники и
информатизации», заведующий научно-методическим
отделом

Барановская Татьяна Петровна
доктор экономических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный
университет», заведующая кафедрой «Системный
анализ и обработка информации»

Григорьев Леонид Иванович
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Российский государственный
университет нефти и газа имени И.М.Губкина»,
заведующий кафедрой «Автоматизированные системы
управления»

Ведущая организация **ФГБОУ ВПО «Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана»**

Защита состоится «20» мая 2015 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 505.001.03 на базе ФГОБУВПО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации» по адресу: Ленинградский проспект, д. 55, ауд. 213, 125993, ГСП-3, Москва.

С диссертацией можно ознакомиться в диссертационном зале Библиотечно-информационного комплекса ФГОБУВПО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации» по адресу: Ленинградский проспект, д. 49, комн. 203, 125993, ГСП-3, Москва и на официальном сайте ФГОБУВПО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации»: <http://www.fa.ru>.

Автореферат разослан «12» февраля 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 505.001.03,
кандидат экономических наук, доцент

Городецкая Ольга Юрьевна

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Имитационное моделирование (далее ИМ) начало бурно развиваться с начала 60-х годов прошлого века. В то время появились такие, известные и знаковые языки имитационного моделирования, как SIMULA, GPSS и SIMSCRIPT. И на протяжении более чем 60 лет идет постоянное развитие и совершенствование теоретических методов и программных средств ИМ.

При зарождении ИМ больше внимания уделялось развитию средств разработки и верификации самой имитационной модели и нужно сказать, что на сегодняшний день почти все языки ИМ позволяют пользователям создавать модели сложнейших систем. В дальнейшем все больше и больше приходило понимание того, что нужно не только создать модель, а и провести исследование. Это достаточно сложный, итеративный и длительный процесс – от постановки задачи, сбора и обработки статистики, разработки имитационной модели, проведения экспериментов вплоть до документирования процесса исследования и выработки рекомендаций по результатам моделирования. Будем далее этот процесс называть имитационным исследованием сложных экономических систем (далее ИИСС). Наиболее подробно методология и технология процесса ИИСС, используемая в реальных исследованиях, описана в классических трудах Н.П. Бусленко, Т. Нейлора, Р. Шеннона и называется традиционным подходом. Методология традиционного подхода не менялась с 70-х годов прошлого столетия. Главным недостатком данного подхода являлся тот факт, что метод ИМ за эти годы так и не стал массовым инструментом. Хотя имеется огромная потребность общества в создании имитационных моделей и потенциально эти модели могут быть построены. Но высокий уровень профессиональных требований к исследователю, большая длительность и высокая стоимость исследования позволяют осуществлять процесс ИИСС лишь незначительного числа моделей.

Традиционный подход является основным для исследователей и в настоящее время. Хотя произошло множество изменений, в основном связанных с развитием и использованием информационных технологий. Попытки автоматизации всех процессов в ИИСС выявили необходимость методического описания и комплексного решения ряда вопросов, не предусмотренных традиционной технологией, – изменение количества и содержания этапов, унификации используемых данных и результатов, обеспечения информационной совместимости этапов, создание единого языка взаимодействия исследователя на протяжении всего процесса ИИСС, распределения и оптимизации

вычислений и т.д. Это привело к необходимости кардинального переосмысления, развития и совершенствования методологии традиционного подхода к ИИСС.

Современные языки и системы ИМ позволяют автоматизировать в рамках одной программы значительную часть процесса исследования. Но все эти разработки осуществлялись без глубокой методической и теоретической проработки. Каждый разработчик создавал то, что знал и мог, ставя во главу угла, прежде всего, свой коммерческий интерес. И самое главное методическое упущение состоит в том, что все эти разработки полностью основывались на идеологии традиционного подхода к ИИСС. Поэтому даже современные модернизированные программные среды для проведения ИИСС чрезвычайно неэффективны, длительны по времени и требуют высокой квалификации исследователя.

Учитывая все вышесказанное, можно сделать вывод, что необходимость в разработке новых концепций, развитии методологии проведения исследований и достижения эффективности и массовости процесса ИИСС является исключительно важной и актуальной задачей.

Степень разработанности проблемы исследования. Большой теоретический и практический вклад в развитие системного анализа и имитационного моделирования внесли многие выдающиеся советские ученые: Н.П. Бусленко, В.М. Глушков, В.В. Калашников, М.И. Нечепуренко, Н.Н. Моисеев, И.В. Максимей, Ф.И. Перегудов, В.Я. Петров, А.А. Самарский, А.И. Уемов и другие. Их исследования и разработки продолжил целый ряд российских ученых: В.Н. Волкова, О.В. Голосов, И.Н. Дрогобыцкий, В.Н. Задорожный, С.В. Емельянов, А.А. Емельянов, Н.Б. Кобелев, В.М. Львов, С.В. Микони, И.П. Норенков, Ю.И. Рыжиков, Г.И. Росс, Б.В. Соколов, Ф.П. Тарасенко, Р.М. Юсупов, С.А. Яковлев и другие. Ими заложены теоретические основы целого ряда направлений имитационного моделирования. Например, агрегативный подход, общая теория имитационного моделирования, аналитико-имитационный подход, квалиметрия качества моделей.

Следует отметить огромную значимость для развития теоретических основ и методологии создания имитационных моделей и проведения исследования трудов зарубежных ученых: Л. фон Берталанфи, М. Месаровича, И. Тахакара, Р. Шеннона, Т. Нейлора, В. Кельтона, А. Лоу, Г. Буча, А. Якобсона, Д. Бэнкса, Л. Клейнрока, Дж. Гордона, А. Прицкера, Д. Хенриксона, И. Столла, Лоренца, Т. Шрайбера, С. Кокса и др.

Отправной точкой практического использования ИМ в мире является появление специализированных языков и систем моделирования. Это такие языки, как GPSS, SOL,

SIMSCRIPT, SIMULA, SLAM, НЕДИС, SIMAN, SIMULINK и множество других. В настоящий момент за более чем 50 лет развития созданы сотни языков и систем ИМ.

Можно выделить 14 основных языков, наиболее распространенных и используемых в настоящее время в мире. Это такие языки, как ExtendSim, AutoMod, ProModel, Arena, GPSS/H, SLX, GPSS World, SIMIO, AnyLogic, SIMSCRIPT III, SIMPROCESS, SIMULA 67, ARIS, SIMUL8. В мире ежегодно разрабатывается огромное количество имитационных моделей с использованием этих языков и систем.

Появилось множество научных разработок и российских программных продуктов, развивающих теорию и практику ИИСС. Можно говорить о появлении целого ряда научных школ в России по ИМ: агентных технологий (Ю.А. Ивашкин, А.В. Борщев, В.Н. Задорожный, К.А. Аксенов, Е.Ф. Смолий, В.Б. Тарасов, А.Н. Швецов); распределенного и облачного моделирования (Р.Л. Смелянский, С.А. Власов, А.И. Миков, Л.Н. Лядова, Е.Б. Замятина, В.В. Окольников, А.С. Родионов); операционного моделирования (Л.В. Вишнякова, О.В. Дегтярев, В.В. Попович, Я.А. Ивакин, В.Р. Ляпин, Н.В. Митюков, И.Ф. Савченко); транспортной и складской логистики (В.А. Зуев, Е.В. Кузнецова, И.В. Макарова, Р.Г. Хабибуллин).

В последние годы появилось много монографий, учебных и методических пособий по различным направлениям ИМ на русском языке. Например, это работы Т.И. Алиева, Н.Б. Кобелева, В.Н. Томашевского, Е.Х. Ждановой, В.Д. Боева, А.Н. Бражника, И.Ю. Бродского, Ю.Г. Карпова, Г.А. Сырецкого, В.М. Черненко, И.М. Якимова, Ю.Н. Павловского, В.С. Смородина, Б.Я. Советова, С.А. Яковлева, Е.М. Кудрявцева, Н.Н. Лычкиной, В.А. Половникова, И.В. Трегуб, С.А. Бронева.

Рынок применений ИИСС потенциально огромен. Имитационные исследования чрезвычайно важны, а иногда являются единственным методом для оценки и анализа инноваций, оптимизации издержек предприятий и проектов, повышения производительности труда и увеличения выпуска продукции. Существует множество апробированных на практике направлений применения ИИСС – банковское дело, экономическое прогнозирование, транспортная логистика, промышленное моделирование, исследование эффективности организационно-технических систем, анализ военных операций, оценка энергоэффективности производств и т.д.

В некоторых странах данный рынок осваивается давно и успешно. Например, в США это огромная индустрия с заказами на несколько миллиардов долларов и сотнями тысяч специалистов, занимающимся их исполнением. В Германии, по оценкам Ю.И. Толуева, ежегодно выполняется проектов по ИИСС более чем на 300 миллионов

евро. Для других стран, в том числе и России, предстоит еще много сделать для развития рынка применений ИИСС.

В последние годы наметилась тенденция снижения темпов роста практических применений ИИСС. Большинство специалистов единодушны во мнении, что это не означает насыщение рынка применений ИИСС. Наоборот, систем, требующих исследования, становится все больше.

Действительно, системный анализ необходим для анализа существующих и модернизируемых систем любого среднего и крупного предприятия – логистики поставки комплектующих и материалов, эффективности применяемых технологий, оптимальности организации производств, выполнимости производственных планов и т.д. Для России, учитывая количество функционирующих предприятий¹, это необходимость проведения ежегодно сотен тысяч исследований. А сейчас их проводится только несколько сотен в год, т.е. в тысячи раз меньше, чем это необходимо. Такая ситуация характерна и для стран с развитым рынком применений ИИСС, разница в том, что там разрыв реальных и потенциальных применений меньше. Но все равно в среднем рынок применений ИИСС в мире освоен не более чем на 10%.

Очевиден огромный разрыв между потребностью экономики в имитационных исследованиях и числом практически проводимых исследований. Это происходит потому, что создаваемые инструментальные средства ИМ так и не стали массовым инструментом, оставаясь, по определению Р. Шеннона, «искусством и наукой».

Многие предприятия и исследователи отказываются от проведения ИИСС из-за ряда причин, главными из которых являются:

- Методические и программные инструментальные средства исследования остаются чрезвычайно сложными, не удовлетворяют Заказчиков по удобству и простоте использования, требуют высокой квалификации исполнителей и под силу только профессионалам ИМ;
- Освоение целого ряда разрозненных программных средств, используемых при проведении ИИСС, требует больших затрат времени. В результате проведение исследований затягивается, и время получения практических рекомендаций исследования не соответствует современным темпам принятия управленческих решений.

Практика использования современных инструментальных средств показывает, что применение самых современных информационных технологий не дает должного

¹ Федеральная служба государственной статистики (Росстат). РОССИЯ 2013 Статистический справочник / Под редакцией Е.А. Суринова. – М.: Информационно-издательский центр «Статистика России», 2013. – С. 20.

эффекта. И это связано с тем, что методологической основой проведения ИИСС до сих пор остается традиционный подход. Требования и ожидания Заказчиков исследований значительно повысились. А методологические подходы к проведению ИИСС остались на уровне конца прошлого века.

В силу этого научное исследование, направленное на развитие методологии проведения ИИСС, приведение программных технологий ее реализации к современному уровню позволит предложить принципиально новые инструментальные средства и положит начало массовому практическому применению метода ИМ.

Объект исследования. Жизненный цикл ИИСС, методология и технология проведения ИИСС, моделируемые экономические системы и участники исследований.

Предмет исследования. Процесс организации и проведения ИИСС, рассматриваемый с позиций автоматизации всех действий исследователя, системного объединения создаваемых программ в интегрированный программный комплекс.

Цели и задачи исследования. Основной целью диссертационного исследования является решение научной проблемы повышения эффективности проведения ИИСС на принципах программной интеграции, унификации и упрощения процесса исследования.

Достижение поставленной цели потребовало решение следующих задач:

1. Провести структурно-функциональный анализ рынка ИИСС, выявить области и уровень применения метода ИМ, проанализировать применяемые методы и технологию проведения исследований, языки моделирования, оценить уровень автоматизации и комплексности исследований.

2. Выявить главные факторы, влияющие на динамику повышения эффективности проведения ИИСС, увеличения количества разрабатываемых имитационных моделей, повышения качества проводимых исследований и снижения стоимости исследования. Результатом должно быть установление взаимосвязи между показателями эффективности процесса ИИСС и этими факторами.

3. Проанализировать влияние на структуру и технологию проведения ИИСС эволюционных изменений процесса за счет комплексной автоматизации традиционного процесса ИИСС. В результате должны быть выработаны основные концепции повышения эффективности проведения ИИСС.

4. Создать формальную модель проведения и управления ИИСС, позволяющую описать основополагающие принципы разработки глобальных интегрированных программных систем проведения ИИСС. Это позволит создать теоретическую базу совершенствования и развития методологии ИИСС.

5. Сформулировать концепции и принципы новой методологии проведения ИИСС. Результатом практического применения обновленной методологии должны стать возможность создания концептуальных моделей систем автоматизации имитационных исследований (САИИ) в различных областях экономики и разработка технологий массового использования этих моделей.

6. Разработать архитектуру и технологию организации облачных вычислений в САИИ для проведения распределенного и удаленного моделирования. Это позволит расширить количество применений ИМ и количество исследователей, увеличить доступность использования метода, при этом уменьшить стоимость и повысить оперативность проведения ИИСС.

7. Оценить эффективность применения усовершенствованной методологии при проведении практических исследований различных сложных систем. Это позволит сравнить основные количественные характеристики проведения ИИСС при использовании новой и традиционной методологии исследования.

8. Разработать программные инструменты и методики их использования, позволяющие осуществлять имитационную экспертизу проектов и технологий за приемлемые для государства и бизнеса сроки.

9. Создать методический и программный базис для формирования и выдвижения законодательной инициативы о необходимости проведения имитационной экспертизы в России для крупных инфраструктурных проектов, осуществляемых на бюджетные средства.

Область исследования. Исследование выполнено в рамках пунктов: 1.2. «Теория и методология экономико-математического моделирования, исследование его возможностей и диапазонов применения: теоретические и методологические вопросы отображения социально-экономических процессов и систем в виде математических, информационных и компьютерных моделей»; 1.7. «Построение и прикладной экономической анализ экономических и компьютерных моделей национальной экономики и ее секторов»; 2.1. «Развитие теории, методологии и практики компьютерного эксперимента в социально-экономических исследованиях и задачах управления»; 2.2. «Конструирование имитационных моделей как основы экспериментальных машинных комплексов и разработка моделей экспериментальной экономики для анализа деятельности сложных социально-экономических систем и определения эффективных направлений развития социально-экономической и финансовой сфер» Паспорта специальности 08.00.13 – Математические и инструментальные методы экономики (экономические науки).

Методологической и теоретической основой исследования послужили труды ведущих зарубежных и российских ученых, посвященные различным аспектам имитационного моделирования, методологии проведения исследований, системного анализа. Также использовались отраслевые нормативные документы, официальные документы министерств и ведомств по данной проблеме, документы и рекомендации национального общества имитационного моделирования, международный опыт. При формализации процесса имитационных исследований использовался математический аппарат теоретико-множественного подхода, общей теории имитационных исследований, квалиметрия моделей и теория оптимального управления имитационными моделями.

Информационной базой исследования являются: результаты экспертных оценок, полученных членами НОИМ при проведении ИИСС; базы данных официальных органов государственной власти РФ; отраслевые и российские стандарты в области информационных технологий; международные стандарты в области ИМ; материалы научных конференций по ИМ в России и странах бывшего СССР (ИММОД, МОДС, КОММОД и т.д.), в Европе (EUROSIM, ECMS, UKSim и т.д.), в США (Winter Simulation, Summer Sim, ASM и т.д.), в других странах (Asia MIC, JSST, SimTecT); публикации в ведущих научных журналах по ИМ (Simulation, SNE, SIMM и т.д.).

Научная новизна исследования заключается в формировании новых принципов развития и совершенствования методологии имитационных исследований. Суть нового подхода состоит в переходе от концепции «Этапов и состояний», используемой в традиционной методологии проведения процесса ИИСС, к концепции «Программ и технологий вычислений». Этот переход базируется на введении парадигмы четырех взаимодополняющих уровней абстракции процесса ИИСС – структурно-функциональный уровень (*S*), язык взаимодействия исследователя с программами (*ЯП*), уровень исходных данных и результатов (*СОД*) и архитектура вычислений (*B*). На основе введенных абстрактных уровней созданы концептуальные основы проектирования интегрированных программных систем проведения ИИСС – систем автоматизации имитационных исследований (САИИ), разработаны методические рекомендации для реализации практических моделей в различных областях экономики.

В ходе выполнения работы автором получены следующие основные теоретические и практически значимые результаты:

1. На основе обзора средств ИМ и анализа применений ИИСС построена формальная модель традиционного процесса и выявлена совокупность факторов, влияющих на повышение эффективности проведения ИИСС. Получены количественные

и графические зависимости базисных показателей процесса ИИСС от основных факторов (С. 95-119).

2. В результате исследования эволюции традиционного процесса ИИСС выявлены существенные изменения структурно-функционального уровня (S). Значительно изменилось количество действий исследователя и их функциональное наполнение ручных (P) и автоматизированных операций, содержащихся в технологии этапов ($Tech_s$). Это привело к существенному дисбалансу скорости вычислений, лексическому многообразию, сложностям информационного обмена и коллизиям управления ИИСС (U) (С. 138-151).

3. Для снятия коллизий управления процессом ИИСС, с учетом изменения структуры исследования и совершенствования информационных и программных технологий, внесены существенные изменения в традиционную методологию проведения ИИСС. Введена парадигма представления процесса ИИСС, которая позволила перейти от одного структурно-функционального уровня (S) при традиционной технологии к представлению ИИСС в виде четырех абстрактных уровней ($S \rightarrow СОД \rightarrow ЯП \rightarrow B$) (С. 156-165).

4. Разработаны и теоретически обоснованы концепции построения САИИ, базирующейся на принципах облачных вычислений – «имитационное моделирование как услуга» (PaaS модель). Осуществлена экспериментальная программная реализация данной модели в проекте GPSS Cloud (С. 195-203).

5. На основе усовершенствованной методологии проведения ИИСС, теории агрегатов Н.П. Бусленко и общей теории имитационного моделирования Н.Б. Кобелева разработаны концептуальные модели трех различных предметных групп САИИ – для профессионалов ИМ (A_{np}), для массового использования (A_m), для корпоративного применения (A_k) (С. 205-208, 228-235, 236-238).

6. Разработаны программные спецификации и проведена программная реализация нескольких САИИ по созданным концептуальным моделям каждой предметной группы. В рамках данных САИИ созданы принципы и алгоритмы проектирования библиотек типовых элементарных блоков (ТЭБ) для различных предметных областей. Сформулирована методика разработки имитационных приложений. Введено понятие имитационной экспертизы, проведена ее классификация, разработаны концепции и принципы ее проведения (С. 213-220, 229-247, 59-64).

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы состоит в развитии традиционной методологии проведения ИИСС за счет введения новых абстрактных уровней представления процесса ИИСС, построения на

основе парадигмы этих уровней концептуальных моделей САИИ для трех основных групп применений (профессионалов ИМ, массового использования, корпоративного применения).

Практическая значимость работы состоит в доведении результатов развития методологии до возможности массовой программной реализации САИИ различных типов. Это позволит существенно расширить круг исследователей. Массовость использования достигается за счет возможностей графического проектирования моделей и визуального интерактивного анализа результатов без использования программирования.

С использованием созданных САИИ были реализованы и внедрены реальные имитационные приложения – модель железнодорожного направления, модель транспортной логистики Агропромышленного парка РТ, модель технологических процессов горно-обогатительного комбината, модель крупноблочного строительства судов в верфи, модель анализа и управления транспортными потоками Универсиады 2013 г. в Казани и ряд других.

Предложенные в диссертации методы, подходы и рекомендации позволяют существенно повысить количество и качество создаваемых имитационных моделей в различных отраслях экономики, создают предпосылки устойчивого роста рынка имитационных исследований в России. Это даст толчок применению ИИСС там, где ранее было невозможно, а исследователем может стать любой инженер. Все это будет способствовать повышению общего уровня прогнозирования в стране, снижению экономических издержек на предприятиях при реализации крупных проектов.

На основе полученных в диссертационной работе теоретических и практических результатов и результатов других исследований Национальным обществом имитационного моделирования и Институтом информатики Академии наук Республики Татарстан завершена предварительная работа по оформлению законодательной инициативы «Об обязательном проведении имитационной экспертизы и системного анализа проектов, реализуемых на бюджетные средства».

Степень достоверности полученных результатов, выносимых на защиту, обеспечена использованием: классических процедур системного анализа; теоретико-множественного подхода; агрегативного подхода; общей теории имитационного моделирования; методов теории вероятности и математической статистики; планирования экспериментов; методологии эмпирического анализа и ряда других методических разработок и теоретических подходов. Адекватность разрабатываемых моделей достигалась за счет достоверности используемых данных, точности экспертных

оценок, верификации данных и моделей. Дополнительно адекватность проверялась сравнительным анализом показателей функционирования разработанных моделей с мониторингом показателей работы реальных систем. В частности, отклонение прогнозных показателей модели транспортной системы Универсиады от фактических показателей во время проведения соревнований не превышало 7%.

Апробация и внедрение результатов исследования. Основные положения диссертационного исследования, выносимые на защиту, обсуждены и получили одобрение на 17 международных и 7 Всероссийских конференциях, прошедших с 2003 по 2014 годы. В их числе: на Международной научно-практической конференции «Инфокоммуникационные технологии глобального информационного общества» (г. Казань, Министерство информатизации и связи Республики Татарстан, 16-18 сентября 2003 г.); на Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование, теория и практика» ИММОД-2003 (Санкт-Петербург, ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт технологии судостроения», 14-17 октября 2003 г.); на Второй международной научно-практической конференции «Инфокоммуникационные технологии глобального информационного общества» (г. Казань, Министерство информатизации и связи Республики Татарстан, 2-3 сентября 2004 г.); на Второй всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование, теория и практика» ИММОД-2005 (Санкт-Петербург, ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт технологии судостроения», 19-21 октября 2005 г.), 19-я европейская конференция по имитационному моделированию (г. Рига, Латвия, ECMS, 1-4 июня 2005); на Четвертой международной научно-практической конференции «Инфокоммуникационные технологии глобального информационного общества» (г. Казань, Министерство информатизации и связи Республики Татарстан, 6-7 сентября 2006 г.); на Второй международной конференции «Системный анализ и информационные технологии» (г. Обнинск, ОНИТ РАН, Институт системного анализа РАН, 10-14 сентября 2007 г.); на Третьей всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование, теория и практика» ИММОД-2005 (Санкт-Петербург, ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт технологии судостроения», 17-19 октября 2007 г.); на Девятой Международной научной конференции РосНОУ (Москва, министерство образования и науки России, 15-18 сентября 2008); на Международной научной и технической конференции «Информационные технологии и математическое моделирование систем» (Мальорка, Испания, ЦИТП РАН, 15-25 сентября, 2008 г.); на 13-й симпозиуме IFAC по проблемам управления информацией в производстве (Москва, ИПУ РАН, 3-5 июня 2009 г.); на

Международной научно-технической конференции «Информационные технологии и математическое моделирование систем» (Салоники, Греция, ЦИТП РАН, 7-15 сентября, 2009 г.); на Четвертой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование, теория и практика» ИММОД-2009 (Санкт-Петербург, ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт технологии судостроения», 16-18 октября 2009 г.); на Международной научно-практической конференции «Инновационный путь развития РФ как важнейшее условие преодоление мирового финансово-экономического кризиса» (Москва, ВЗФЭИ, 21-22 апреля 2009 г.); на Международной Конференции «Информационные технологии и математическое моделирование систем» (Бордо, Франция, ЦИТП РАН, 13-21 сентября 2010 г.); на Международной Конференции «Информационные технологии и математическое моделирование систем» (Сардиния, Италия, ЦИТП РАН, 5-15 сентября 2011 г.); на Пятой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование, теория и практика» ИММОД-2011 (Санкт-Петербург, «Центральный научно-исследовательский институт технологии судостроения», 19-21 октября 2011 г.); на Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию социально-экономических систем (Москва, ВЗФЭИ, 15 мая 2012 г.); на Международной Конференции «Информационные технологии и математическое моделирование систем» (Искья, Италия, ЦИТП РАН, 17-25 сентября 2012 г.); на Седьмой конференции IFAC по моделированию и управлению производственными системами (Санкт-Петербург, ИПУ РАН, 19-21 июня 2013 г.); на Международной Конференции «Информационные технологии и математическое моделирование систем» (Лиссабон, Португалия, ЦИТП РАН, 9-17 сентября 2013 г.); на Шестой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование, теория и практика» ИММОД-2013 (г. Казань, Академия наук Республики Татарстан, НОИМ, 16-19 октября 2013 г.); на Третьей международной конференции «Наука, образование, инновации» (г. Шумен, Болгария, Болгарская Академия наук, 21-23 мая 2014 г.).

Результаты диссертационного исследования связаны с исследованиями, проводимыми в ФГОБУВПО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации» в рамках Общеуниверситетской комплексной темы «Устойчивое развитие России в условиях глобальных изменений» на период 2014-2018 гг. по межкафедральной подтеме «Математические методы, количественные модели и информационные технологии в финансах, экономике и образовании в условиях глобальных изменений».

Результаты научного исследования, в частности, использованы в практической деятельности АНО «Исполнительная дирекция спортивных проектов» (г. Казань) при организации пассажирских и грузовых перевозок, транспортной инфраструктуры и логистики. На базе созданных Девятковым В.В. методологии, концептуальных моделей и принципов проектирования имитационных приложений был разработан комплекс имитационных моделей для анализа транспортной логистики Универсиады 2013 года в Казани. Использование комплекса позволило избежать различных нештатных ситуаций, сэкономить силы и средства организаторов соревнований и время участников. Научные методики проведения исследований и программный комплекс моделирования помогли дирекции спланировать и реализовать транспортное обслуживание участников Универсиады на высшем уровне. Это признано руководством России, Республики Татарстан, международной федерацией студенческого спорта FISU и всеми участниками Универсиады.

Материалы докторской диссертации используются специалистами ОАО «Центр технологии судостроения и судоремонта» при выполнении НИР и ОКР. В частности, по разработанной Девятковым В.В. методологии был создан программный комплекс «Имитационное моделирование процессов функционирования цехов укрупнения и насыщения блоков стапельного производства предприятий средне- и крупнотоннажного судостроения». Разработанное инструментальное средство предоставляет технологам принципиально новые возможности по удобству проведения исследования, оперативного ввода данных и визуализации результатов. Это позволяет ускорить время разработки моделей минимум в два раза. Комплекс позволяет решать как прямые, так и обратные задачи моделирования.

Новая методология проведения имитационного исследования использовалась и при выполнении плановых научно-исследовательских работ ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем». Практическое применение результатов диссертационного исследования В.В. Девяткова позволило начать систематизацию разработки имитационных моделей и проведения с ними экспериментов, а также обратить внимание на унификацию и стандартизацию разработок. Подходы, реализованные в диссертации, позволили ускорить цикл разработки моделей ориентировочно на 30% и существенно упростить язык взаимодействия с моделью.

Применение результатов диссертационного исследования Девяткова В.В. в Академии наук Республики Татарстан позволило сформировать новое научное направление – имитационные исследования и осуществить ряд практических

применений. Например, было создано программное инструментальное средство исследований для ФГУП Татинвестгражданпроект. Это позволило оптимизировать логистику движения транспорта в наиболее напряженные дни ярмарок выходного дня в агропромышленном парке РТ. По результатам исследования были сделаны и практически реализованы рекомендации, которые позволили уменьшить объем капитальных вложений в строительство новой парковки.

Научные и методические результаты диссертационного исследования были использованы некоммерческим партнерством «Национальное общество имитационного моделирования» (НОИМ) при разработке проекта федерального закона «Об имитационной экспертизе». В частности, были использованы сформулированные Девятковым В.В. определение имитационной экспертизы, результаты анализа предметных областей применения, концептуальных моделей систем автоматизации имитационных исследований. В настоящее время проект закона готовится к обсуждению и дискуссии среди членов НОИМ и других специалистов по имитационному и комплексному моделированию с целью последующего оформления рассматриваемых материалов в виде законодательной инициативы.

Основные положения диссертационного исследования являются основой разработанной системы автоматизации имитационных исследований «Расширенный редактор GPSS World». Редактор широко используется при проведении учебного процесса и научных исследований в ряде университетов России.

Например, в ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева» данное инструментальное средство используется в преподавании учебных дисциплин «Моделирование систем» и «Моделирование информационных систем» на кафедрах «Автоматизированные системы обработки информации и управления» и «Компьютерные системы». Применение инструментального средства «Расширенный редактор GPSS World» позволило в разы ускорить время разработки учебных и научных моделей. При использовании библиотек типовых элементов можно разработать и автоматически сгенерировать модель, только построив структурную схему, без какого либо программирования.

В ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» расширенный редактор GPSS World используется на кафедре «Интеллектуальные системы управления информационными ресурсами» в процессе преподавания учебной дисциплины – «Моделирование систем» для специальности 220200 – Автоматизированные системы обработки информации и управления.

Материалы диссертации Девяткова В.В. используются в Институте вычислительной математики и информационных технологий ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» кафедрой «Системный анализ в информационных технологиях» в процессе преподавания дисциплины «Моделирование информационных процессов».

Внедрения результатов диссертационного исследования при практических исследованиях и в учебный процесс подтверждены справками о внедрении.

Публикации. Основные положения и результаты исследования отражены в 56 научных публикациях, общим объемом 73,21 п.л., авторский объемом 54,92 п.л., в том числе в авторской монографии объемом 28,0 п.л., в авторском научном издании объемом 8,9 п.л., двадцати четырех статьях общим объемом 18,37 п.л. (авторский объем – 11,43 п.л.) в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК Минобрнауки России.

Структура диссертационной работы. Структура диссертации обусловлена ее целью поставленными задачами, логикой проведения исследования. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 173 наименований и четырех приложений. Диссертация изложена на 344 страницах и содержит 166 рисунков, 6 таблиц и 58 формул.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

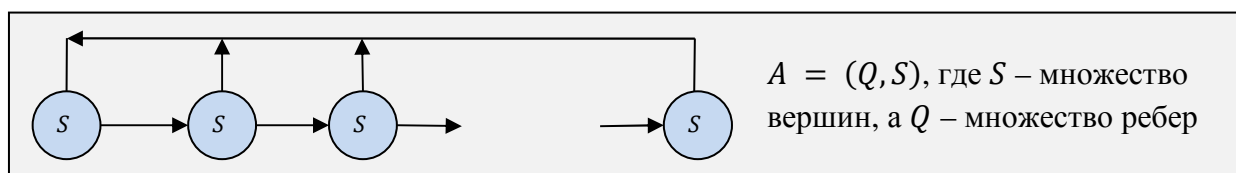
Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. На основе обзора средств ИМ и анализа применений ИИСС построена формальная модель процесса и выявлена совокупность факторов, влияющих на повышение эффективности проведения процесса ИИСС. Получены количественные и графические зависимости базисных показателей ИИСС от основных факторов.

Методологически при проведении ИИСС необходимо последовательно выполнить ряд последовательных действий (этапов) от постановки задачи, мониторинга и накопления исходных данных, разработки модели, планирования и проведения экспериментов с моделью и т.д. до выработки рекомендаций по результатам исследований. Данный процесс в самом общем виде можно представить в виде конечного ориентированного орграфа, как показано на рисунке 1.

Каждый из этих этапов алгоритмически описан и теоретически обоснован, для большинства из них, в настоящее время, созданы специализированные компьютерные

программы. Однако, несмотря на огромные усилия ученых и специалистов, процесс ИИСС все еще длителен по времени и очень сложен в профессиональном исполнении.



Источник: составлено автором.

Рисунок 1 – Графическое представление процесса ИИСС

В работе осуществлен анализ эффективности проведения ИИСС по двум направлениям – по используемым инструментальным средствам и по области (рынку) применения.

Инструментальные средства. Это языки имитационного моделирования и симуляторы, которые сейчас наиболее часто используются в мире. В частности, это такие языки, как: ExtendSim, Automod, ProModel, Arena, GPSS/Н, SLX 2.0, GPSS World, SIMSCRIPT III, SIMPROCESS, СИМУЛА-67, SIMIO, SIMUL8, AnyLogic. Кроме того, анализировались и инструментальные средства ИМ, разработанные в России и странах СНГ. Например, профессиональный инструмент моделирования AnyLogic, общецелевые системы ИМ Object GPSS и Future GPSS, моделирующая система Actor Pilgrim, среда моделирования Rand Model Designer и ряд других.

Каждое инструментальное средство ИМ имеет свои особенности и отличия при реализации процесса проведения исследования. Это и функциональные возможности языка, сложность освоения его пользователем, наглядность и визуализация ввода данных и представления результатов, степень охвата этапов ИИСС, средства управления и организации проведения исследования, возможности документирования результатов и т.д. И таких различий на самом деле множество.

Рынок применений ИИСС. Очень многие факторы успешного проведения ИИСС зависят не только от языка, на котором пишется модель, но от предметной области применения этой модели. Метод ИМ можно использовать в качестве инструмента системного анализа любого предприятия – выбор организационной структуры, анализ технологий, совершенствование логистики и маркетинга, оптимизации ресурсов и ряда других задач. Все вместе это составляет огромный рынок имитационных исследований. Если брать только Россию, то это десятки и даже сотни тысяч возможных применений. Анализ, проведенный в данной работе, показал, что существующие средства ИМ не устраивают множество потенциальных пользователей ИМ. Поэтому в мире моделирование используется не более чем в 10% возможных случаев применения.

Особенно мал этот процент в России. В масштабе страны это, наверное, только несколько сотен примеров в год, т.е., примерно, десятые доли процента от возможных применений.

Для каждого применения существует множество нюансов и особенностей проведения процесса ИИСС. Это связано с необходимостью погружения в предметную область, с большими различиями в квалификации исследователя, многообразием задач, поставленных при проведении исследования, и т.д.

В качестве группы основных факторов, влияющих на эффективность проведения процесса ИИСС, были выбраны следующие факторы: уровень автоматизации этапов и всего исследования, производительность используемых вычислительных систем, применяемая архитектура и распределение вычислений, уровень используемых теоретических методов и алгоритмов.

Для каждого фактора был определен способ или формула определения его количественного значения, возможные диапазоны изменения. Например, уровень автоматизации процесса ИИСС при использовании той или иной программной технологии вычислялся по формуле (1):

$$A_{ии} = \left(\sum_{i=1}^n \left(C_i \sum_{j=1}^{m_i} \frac{C_{ij} * A_{ии ij}}{m_i} \right) \right) / n, \quad (1)$$

где нормирующие коэффициенты C_i и C_{ij} изменяются в диапазоне $[0,1]$, n – количество этапов ИИСС, m_i – количество состояний этапа i .

Для количественной оценки влияния факторов используемой программной технологии и области применения на качество исследования был введен ряд показателей функционирования процесса ИИСС.

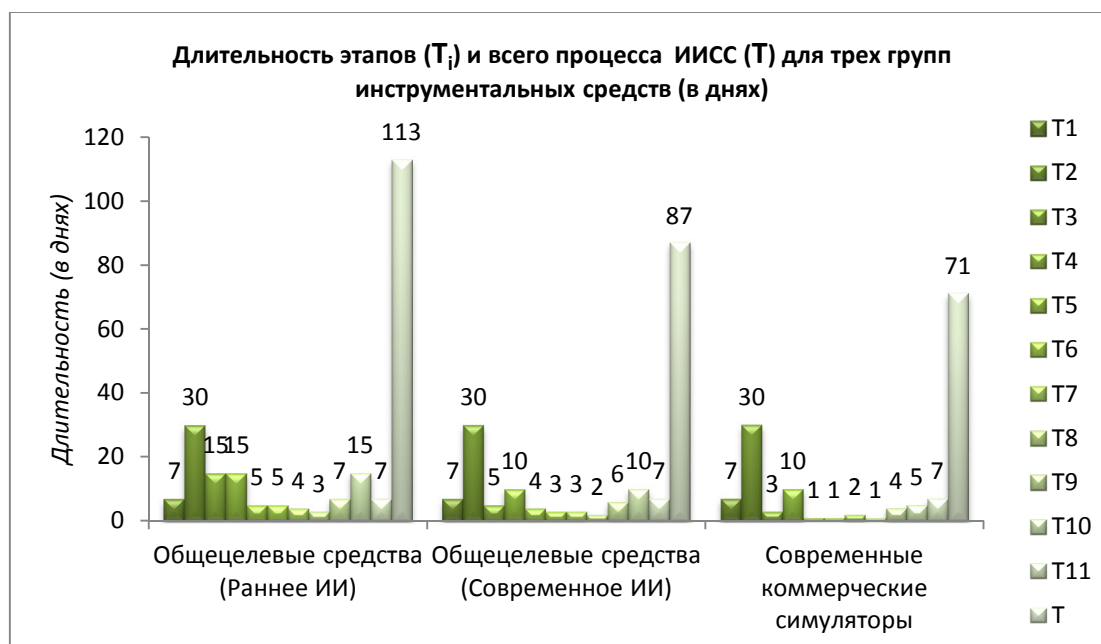
Время проведения исследования $T_{ии}$. Для определения наиболее критичных этапов проведения ИИСС был осуществлен анализ длительности всего исследования ($T_{ии}$) и его отдельных этапов (T_i) в различных программных средах с разделением на 11 этапов традиционной методологии ИИСС². Сам показатель длительности ИИСС определялся по формуле (2):

$$T_{ии} = \sum_{i=1}^n T_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} r_i^j * t_i^j, \quad (2)$$

где $i = 1, \dots, n$ – количество этапов; $j = 1, \dots, m_i$ – количество состояний этапов, r_i^j и t_i^j – соответственно, повторяемость состояний этапов и их длительность. Все используемые инструментальные средства ИМ были разделены на три группы (по моменту их возникновения и функционалу). Результаты анализа для каждой группы приведены на рисунке 2. Из него видно, что длительность исследования хоть и

²Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978. С. 58-63

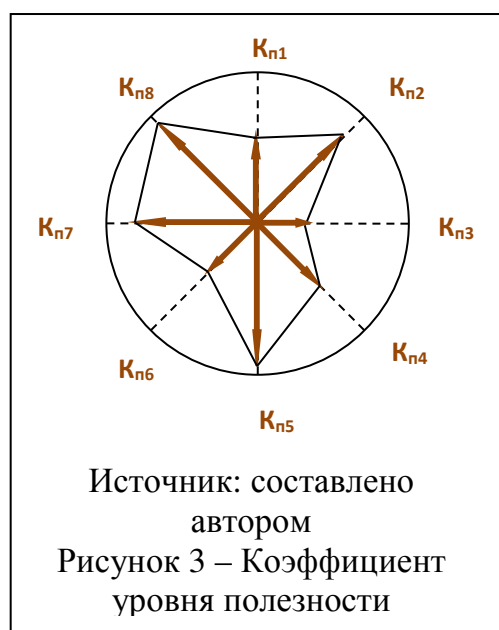
снизилась, но все равно остается очень большой. Следует отметить и неоднородное распределение длительности исследования по этапам.



Источник: составлено автором.

Рисунок 2 – Анализ средней длительности исследования

Коэффициент уровня полезности K_n . Созданная исследователем модель и результаты исследования могут быть не пригодны для практического применения. На практике это происходит нередко. Поэтому в диссертации был введен коэффициент уровня полезности K_n – количественной оценке выполнения цели и множества задач. Полезность модели можно оценивать либо интегральным коэффициентом K_n (достижение цели), либо по каждой локальной задаче k_{ni} . Тогда формально K_n можно



представить в виде множества $K_n = \{k_{ni}\}$, где $i = 1, \dots, l$, а l общее количество показателей. Значение уровня полезности с учетом значимости показателей (через коэффициенты) можно представить в следующем виде. $K_n = \sum_{i=1}^l C_i * k_{ni}$, где $i = 1, \dots, l$, а коэффициенты значимости C_i изменяются в диапазоне $(0,1]$ и $c_i \neq 0$. Графически уровень полезности представлен на рисунке 3.

Результаты исследования показывают, что значение коэффициента K_n для завершенных и принятых Заказчиком разработок находится в интервале от 0,5 до 0,8. Достигнуть идеала, равного значению $K_n = 1$,

практически невозможно, так как любая модель содержит погрешность. Уровень полезности аналогичен показателям адекватности модели, только распространяется он не на одну модель, а на всю технологию проведения процесса ИИСС. И его значение в 20-30% от идеального значения считается вполне допустимым для использования результатов. Значение коэффициента менее 50% делает модель практически бесполезной.

Индекс потенциального использования программной технологии $K_{\text{исп}}$. Теоретически область использования имитационного моделирования практически не ограничена. Нет ни одного предприятия и системы, для которых нельзя было бы применить метод ИМ. Основным ограничением использования является требуемый уровень квалификации исследования. При исследовании эффективности процесса ИИСС введен показатель требуемой для использования программной технологии квалификации, который вычислялся по формуле (3):

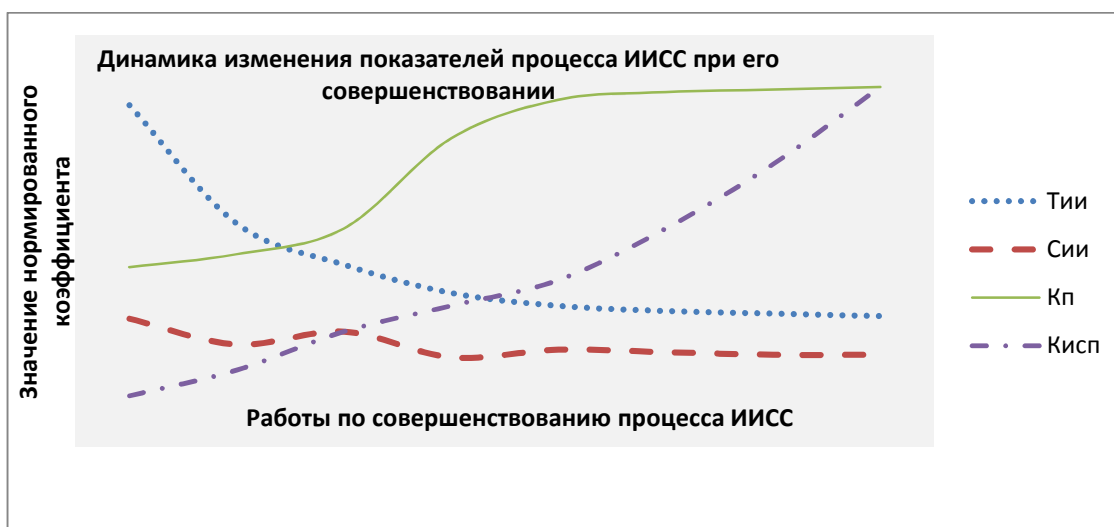
$$K_{\text{исп}} = NK_{\text{исп}} = \frac{N_{\text{им}}}{N_{\text{инж}}} = \frac{\sum_{i=0}^{10} N_{\text{вуз}}^i + N_{\text{уч}}}{N_{\text{инж}}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{им}}$ – потенциальное число пользователей метода ИМ, $N_{\text{вуз}}^i$ – количество выпускников университетов ряда специальностей, $N_{\text{уч}}$ – специалистов, имеющих ученую степень или обучающихся в аспирантуре, $N_{\text{инж}}$ – количество инженеров, глубина сохранения знаний (в годах) $i = 1, \dots, 10$.

Стоимость проведения имитационного исследования $C_{\text{ии}}$. С учетом всех видов применений – учебных, научных и практических моделей – была введена формула расчета стоимости проведения ИИСС: $C_{\text{ии}} = C_{\text{дог}} + C_{\text{по}} + C_{\text{об}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{соп}}$, где $C_{\text{дог}}$ – стоимость договора Заказчика с Исполнителем, $C_{\text{по}}$ – стоимость приобретаемого программного обеспечения или стоимость владения (аренда), $C_{\text{об}}$ – стоимость обучения специалистов Заказчика работе с моделью, $C_{\text{зп}}$ – стоимость затрат на фонд оплаты труда, $C_{\text{соп}}$ – стоимость сопровождения.

Далее, исходя из опыта практических исследований, статистических данных и результатов экспертных оценок было проведено исследование влияния выделенных факторов на показатели функционирования процесса ИИСС. На рисунке 4 все показатели приведены к нормированному виду.

Анализ результатов показал, что резервы улучшения основных показателей проведения ИИСС имеются и состоят они в основном: в автоматизации начальных и конечных этапов исследования, комплексном проведении ИИСС и упрощении языка взаимодействия исследователя с программой.



Источник: составлено автором.

Рисунок 4 – Динамика изменения показателей процесса ИИСС

2. В результате исследования эволюции традиционного процесса ИИСС выявлены существенные изменения структурно-функционального уровня (S). Значительно изменились количество действий исследователя и их функциональное наполнение (ручных операций (P) и автоматизированных, содержащихся в технологии этапов ($Tech_3$)). Это привело к существенному дисбалансу скорости вычислений, лексическому многообразию, сложностям информационного обмена и коллизиям управления ИИСС (U).

Формально традиционный подход к ИИСС можно охарактеризовать как концепцию «этапов и состояний». В диссертации была разработана расширенная модель традиционного процесса ИИСС, представляющая собой некоторую совокупность множеств, функционально зависящих и взаимодействующих друг с другом – целей (Ц), этапов (S_i), состояний этапов (S_i^j), их взаимосвязей (Q_i, Q_i^j), ручных ($U_{p_i}^j$) и автоматизированных действий ($U_{n_i}^j$) управляющих воздействий исследователя, и показателей (Π_i): $S = ((\Pi_i), (S_i), (S_i^j), (Q_i), (Q_i^j), (U_{p_i}^j), (U_{n_i}^j), (\Pi_i))$, где i – количество этапов, j – количество состояний этапа $i = 1, \dots, n$ и $j = 1, \dots, m_j$.

Обозначим через $Tech_3$ совокупность множеств: $Tech_3 = ((S_i^j), (Q_i^j), (U_{n_i}^j))$, реализующих конкретную технологию используемых программных средств для реализации этапов исследования. Тогда формальное описание традиционного процесса ИИСС можно представить следующим образом: $S = ((\Pi_i), (S_i), (Q_i), (U_{p_i}), (\Pi_i), Tech_3)$.

Анализ резервов совершенствования ИИСС показал необходимость улучшения ряда параметров процесса S . В самом общем виде резервы и способы их использования можно сформулировать следующим образом:

1. **Уменьшение длительности всех элементов процесса** – среднего времени однократного выполнения этапа - T_i и среднего времени однократного выполнения состояния этапа - t_i^j за счет их программной реализации;

2. **Минимизация числа действий и операций исследователя в процессе ИИСС**– уменьшение количества этапов (S_i), количества состояний этапов (S_i^j), числа повторений этапов (R_i), числа повторений состояний (r_i^j) и количества управляющих воздействий исследователя ($U_{p_i}^j$ и $U_{n_i}^j$) за счет интеграции используемых программ в единый комплекс;

3. **Упрощение проведения исследования** – автоматизация ввода управляющих воздействий (уменьшения количества ручных операций ($U_{p_i}^j \rightarrow 0$)) и максимальное приближение языка отображения команд ввода и обработки исходных данных, представления и анализа результатов моделирования ($U_{n_i}^j$) к языку исследуемой предметной области.

Детальное исследование эволюции используемых при проведении ИИСС программ позволяет сделать вывод, что под натиском современных информационных технологий, массового появления и программной реализации новых теоретических разработок структура и функции ИИСС в целом, и для каждого этапа исследования в частности, существенно изменились.

1. Изменяется содержательная суть действий исследователя на этапе или в состояниях этапа;

2. Происходит укрупнение этапов. Объединение нескольких этапов в один этап. Переход функций одного из этапов в один или несколько других этапов;

3. Появляются принципиально новые этапы;

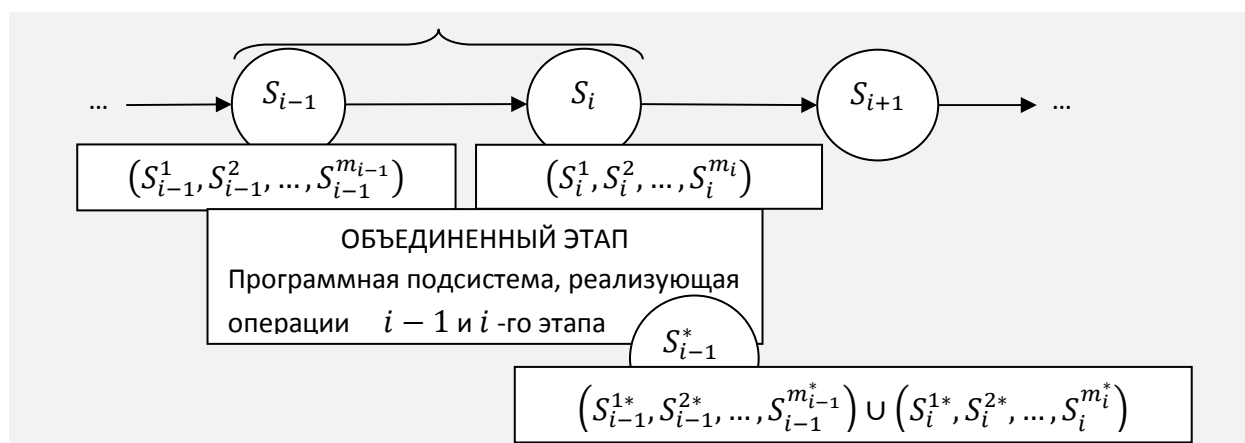
4. Изменяются принципы работы с данными – унификация и централизация накопления, обработки, а также обмена данными и результатами моделирования на всех этапах исследования;

5. Повышается оперативность и интерактивность процессов управления исследованием. Значительно увеличивается количество доступных управляющих воздействий со стороны исследователя, с одновременным расширением возможностей визуализации и анализа;

6. Происходит распределение вычислений в процессе ИИСС (от мобильных устройств до высокопроизводительных компьютеров). Организация исследования, управление процессом и анализ результатов моделирования переносятся на мобильные устройства. Сложные вычисления – на высокопроизводительные компьютеры;

7. Повышается роль коллективных методов проведения ИИСС. Например, подключение к исследованию лучших специалистов на различных этапах ИИСС.

Пример эволюции процесса ИИСС – укрупнение этапов, приведен на рисунке 5.



Источник: составлено автором.
Рисунок 5 – Объединение этапов

В этих случаях границы объединения диктуются возможностями конкретного программного комплекса или подсистемы, его информационной структурой, формами взаимодействия исследователя с этой программой. С математической точки зрения, объединение множеств (этапов) S_{i-1} и S_i не означает полное объединение всех их состояний. На рисунке 5 показано, что сами состояния этапов (все или частично), их суть и даже количество состояний могут измениться.

Т.е. количество состояний нового этапа может отличаться от общего количества состояний объединяемых этапов $m^{i*} + m^{i-1*} \neq m^i + m^{i-1}$, соответственно любое множество состояний объединяемых этапов $S_{i-1} \cup S_i$ неэквивалентно множеству состояний объединенного этапа S_{i-1}^* .

В качестве иллюстрации укрупнения может служить пример объединения в один этап двух этапов традиционного процесса ИИСС – «Тактическое планирование» и «Стратегическое планирование».

Эволюция ИИСС набрала такой темп и глубину, что при разработке новых инструментальных средств ИМ возникает множество проблем, представляющих методический характер.

Резко возрос уровень автоматизации не только отдельных этапов. Во многих инструментальных средствах ИМ в единые программные комплексы объединялись

соседние этапы. Например, обработка статистики, разработка модели, планирование экспериментов. Т.е. постепенно возникала некоторая программная технология реализации не отдельных этапов, а всего исследования, обозначим ее как – $Tech_{ин}^* = ((Pr_i), (Pr_j^j))$ где Pr_i и Pr_j^j программы, реализующие отдельные этапы исследования и $i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m_j$. Но единых стандартов и рекомендаций реализации этой программной технологии не было. Поэтому вновь внедряемые программные средства приносили существенно меньший эффект по времени и качеству исследования, чем ожидалось.

Также возникал колоссальный дисбаланс между автоматизированными этапами и ручными. Это относилось в первую очередь к времени реализации и передаче результатов выполнения одного этапа на вход другого этапа. В случаях автоматизации время выполнения (t_i и t_i^j) составляло несколько минут, а при ручном исполнении уже следующий этап занимал до нескольких дней. Это не позволяло исследователю работать в одном темпе, приводило к потерям результатов, данных и потенциальных Заказчиков.

Большой проблемой становилась необходимость организации проведения исследования не одним человеком, а коллективом. В этом случае существенно преобразуется и видоизменяется множество управляющих воздействий на процесс ((U_{pi}^j) и (U_{ni}^j)).

Кроме этого необходимо обеспечить работу с программами на современных мобильных устройствах. Для этого необходимо пересмотреть концепцию подхода к организации вычислений. В частности, наиболее серьезную вычислительную нагрузку перенести на сервера, а на мобильных устройствах оставить интерфейс пользователя – ввод данных и анализ результатов.

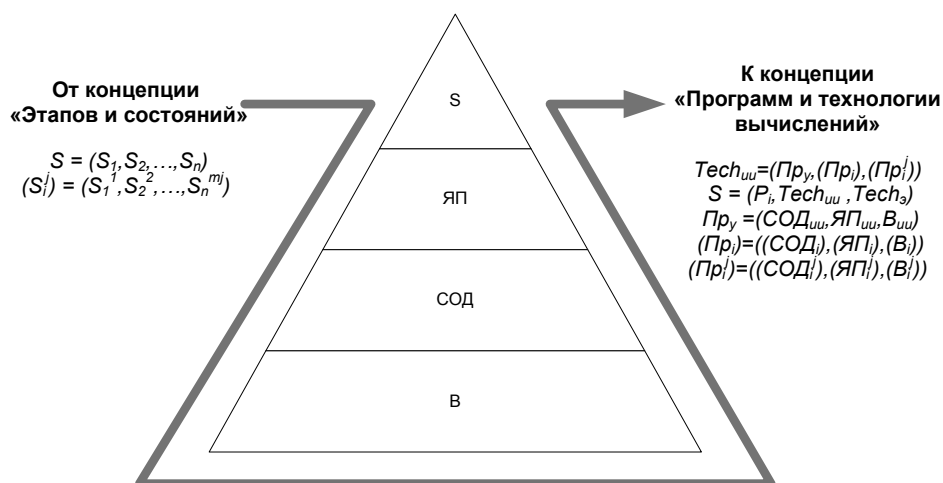
Анализ эволюции процесса ИИСС показал, что проводимые разработчиками инструментальных средств ИМ точечные изменения или корректировки не могут повысить эффективность исследования. Поэтому назрела необходимость в кардинальном совершенствовании методологии проведения ИИСС.

3. Для снятия коллизий управления процессом ИИСС, с учетом изменения структуры исследования и совершенствования информационных и программных технологий, внесены существенные изменения в традиционную методологию проведения ИИСС. Введена парадигма представления процесса ИИСС, которая позволила перейти от одного структурно-функционального уровня (S) при традиционной технологии к представлению ИИСС в виде четырех абстрактных уровней ($S \rightarrow СОД \rightarrow ЯП \rightarrow В$).

Введение программных технологий $Tech_э = (Tech_э^i)$ и $Tech_{ин}$ в формальную модель позволило отразить программные отличия при выполнении отдельных этапов и всего исследования различными инструментальными средствами ИМ, имеющие особенности и нюансы в этой программной среде.

Но этого оказалось недостаточно. Проведенное исследование показало, что создание интегрированного программного комплекса, объединяющего все этапы исследования, кардинально меняет концептуальное и формальное описание процесса ИИСС. В результате усовершенствованная методология проведения процесса ИИСС была представлена в виде парадигмы, состоящей из нескольких, взаимодополняющих абстрактных уровней: структурно-функционального уровня – S ; языка взаимодействия исследователя с программами – ЯП (язык пользователя); уровня данных – СОД (система обработки данных) и уровня архитектуры вычислений – В. Как показано на рисунке 6, в усовершенствованной методологии осуществляется переход представления процесса ИИСС от концепции этапов и состояний (S) к концепции программ и технологии вычислений ($S \rightarrow СОД \rightarrow ЯП \rightarrow В$).

Структурно-функциональный уровень, как и в традиционной методологии, описывает весь процесс исследования с точки зрения последовательности использования и реализации теоретических подходов, методов и алгоритмов. Целью изменения его формального писания была необходимость учесть появление технологии автоматизированной работы не только в рамках отдельного этапа, а и комплексно, во всем процессе ИИСС.



Источник: составлено автором.

Рисунок 6 - Парадигма имитационного исследования

Сначала были проведены предварительные структурные преобразования множеств связанных с общим описанием процесса на уровне этапов – (S_i) , (Q_i) и (U_{pi}) .

Разделим каждое из них на два подмножества с учетом выполняемых исследователем ручных и программных действий: $(S_i) = (S_{p_i}) \cup (S_{n_i})$, $(Q) = (Q_{p_i}) \cup (Q_{n_i})$, $(U_i) = (U_{p_i}^*) \cup (U_{n_i})$.

Следует отметить, что в любом случае в настоящее время остается какое-то количество ручных операций, т.е. полной 100%-ной автоматизации процесса ИИСС нет и множества (S_{p_i}) , (Q_{p_i}) и $(U_{p_i}^*)$ не являются пустыми. Тем более что процесс ИИСС очень чувствителен к любым ручным операциям, особенно это проявляется в значительном увеличении общего времени исследования $T_{ии}$.

Другие множества можно объединить в одно множество, так как они все реализуются в рамках одной общей программы, интегрирующей все этапы исследования в единую программную технологию: $Tech_{ии} = ((S_{n_i}), (Q_{n_i}), (U_{n_i}))$. Тогда описание автоматизированного интегрированного программного комплекса, реализующего процесс ИИСС, можно представить в следующем виде: $S = ((S_{p_i}), (Q_{p_i}), (U_{p_i}^*), Tech_{ии}, Tech_{э})$. Для упрощения условно обозначим множества ручных операций в виде объединенного множества: $P_i = S_{p_i} \cup Q_{p_i} \cup U_{p_i}^*$. Тогда формальное описание структурно-функционального уровня процесса ИИСС, после проведенных преобразований, выглядит следующим образом: $S = (P_i, Tech_{ии}, Tech_{э})$.

На основе введенных в диссертации определений и соображений разумной целесообразности и проведенных структурных преобразований были сделаны следующие предположения и заключения:

1. Число этапов процесса ИИСС $S = (S_i)$ определяется выбранной интегрированной программной технологией исследования $Tech_{ии}$, конечно и равно n . Количество состояний любого этапа i определяется выбранной программной технологией реализации этапа $Tech_{э}$, конечно и равно m_i .

2. Каждому этапу ИИСС (S_1, \dots, S_n) соответствует своя программная подсистема, одна из множества (Pr_1, \dots, Pr_n) . Для всего процесса ИИСС имеется только одна управляющая программа Pr_y .

3. Каждая программная подсистема Pr_i состоит из некоторого множества программных компонент $Pr_i = (Pr_i^1, \dots, Pr_i^{m_i})$, реализующих соответствующие состояния этапов (S_i^j) . Количество программных компонент для каждого этапа определяется выбранной программной технологией $Tech_{э}$.

4. Интегрированная программная технология проведения процесса ИИСС представляет следующий кортеж $Tech_{ии} = (Pr_y, (Pr_i), (Pr_i^j))$ и объединяет все

программы, необходимые для исследования, в том числе и программные технологии этапов $Tech_{\varepsilon}$.

5. Разбиение всего программного комплекса проведения ИИСС на управляющую программу Pr_y , подсистемы (Pr_i), программные компоненты (Pr_i^j) представляет не физическую, а логическую структуру программного комплекса.

6. Технология $Tech_{ин}$ совместно с используемым множеством ручных операций (P_i) и программной технологией $Tech_{\varepsilon}$ функционально полно реализует весь процесс ИИСС.

Далее были рассмотрены структура, характеристики и содержательный смысл программных подсистем и компонент Pr_y, Pr_i, Pr_i^j с точки зрения проектных спецификаций. Каждый элемент этих множеств прежде всего программа, основными проектными характеристиками которых являются: структуры организации используемых данных (СОД), язык пользователя для ввода данных и команд (ЯП), вычислительные программные компоненты (В). Поэтому рассмотрим каждую программную подсистему и компоненту в следующем виде:

$$Pr_y = (СОД_{ин}, ЯП_{ин}, В_{ин}); Pr_i = ((СОД_i), (ЯП_i), (В_i)); Pr_i^j = ((СОД_i^j), (ЯП_i^j), (В_i^j)).$$

В работе приведены детальные спецификации всех этих множеств, в частности, множество управляющих воздействий исследователя на процесс ИИСС в состоянии j этапа i было представлено следующим образом:

$ЯП_i^j = (ST, (DM_i^{jk_1}), (DK_i^{jk_2}), (CM_i^{jk_3}), (CK_i^{jk_4}), EN)$, где вход или выход из программы – ST и EN ; ввод данных по представленному выбору в меню – DM ; ввод данных с клавиатуры – DK ; ввод команды по представленному меню – CM ; i – количество этапов ($i = 1, \dots, n$); j – количество состояний на этапе ($j = 1, \dots, m_i$) и k_1, k_2, k_3 и k_4 – количество типов управляющих воздействий ($k_1 = 1, \dots, l_{j_1}$; $k_2 = 1, \dots, l_{j_2}$; $k_3 = 1, \dots, l_{j_3}$; $k_4 = 1, \dots, l_{j_4}$). Значения n, m_i и $l_{j_1}, l_{j_2}, l_{j_3}$ и l_{j_4} индивидуальны для различных систем ИМ и программ, используемых для всего исследования, любого этапа в этом процессе, каждого состояния этапа и типа диалога. Максимальное значение индексов k_1, k_2, k_3 и k_4 для каждого состояния на любом из этапов различно и равно количеству вариантов ввода данного управляющего воздействия в конкретной программе.

Введение новой парадигмы представления абстрактных уровней процесса ИИСС и результаты проведенной формализации позволили при описании методологии исследования перейти от концепции «Этапов и состояний» к концепции «Программ и технологии вычислений».

4. Разработана и теоретически обоснована PaaS модель САИИ, базирующаяся на принципах облачных вычислений – «имитационное моделирование как услуга». Продемонстрирована реализация данной модели на примере проекта GPSS Cloud с использованием четырех дата-центров и облачных сервисов моделирования и базы данных.

Одной из парадигм усовершенствованной методологии и фактором, влияющим на эффективность проведения процесса ИИСС, являются выбор и построение наиболее подходящей архитектуры вычислений. Поэтому в диссертации было проведено исследование необходимости использования облачных технологий при создании САИИ. Важность использования этой технологии обуславливается:

- высокой сложностью вычислений на всех этапах ИИСС. Особенно сложные и объемные вычисления – это планирование экспериментов, эксперименты с моделью, работа с графикой, хранение и обработка данных, оптимизация и т.д.;
- имеющейся возможностью разделения вычислений в процессе исследования. По сути, каждый этап ИИСС (иногда и его составляющие) – это отдельный и независимый вычислительный процесс. В частности, очень важно обеспечить параллельное исполнение множества экспериментов в серии;
- работой над имитационными проектами больших коллективов специалистов, чаще всего распределенных территориально (внутри здания, города, страны и т.д.). Необходимо обеспечить равнозначный их полномочиям доступ к проекту, синхронизировать работу с данными и результатами;
- необходимостью сокращения сроков исследования и доведения их до уровня, когда время проведения исследования согласуется с технологической и экономической целесообразностью;
- необходимостью уменьшения стоимости владения технологии ИИСС исследователем. Использование облачных сервисов избавит от приобретения стационарного и очень дорогостоящего программного обеспечения.

Облачный подход позволяет упростить и унифицировать проведение исследований для конечных пользователей, абстрагировать исследователя от технических особенностей организации вычислений. Система, созданная при таком подходе, является инвариантной по отношению к окончательному аппаратному и программному обеспечению. Ее отличительным достоинством являются минимальные требования к пользовательскому оборудованию – для проведения самых сложных имитационных исследований достаточно обычного интернет-планшета.

В диссертации проведено формальное описание практического проекта GPSS Cloud на основе аксиоматической облачной теории, предложенной Джо Виенманом³.

Облако представлено в виде структуры, удовлетворяющей пяти формальным аксиомам: общности, независимости от местоположения, постоянного подключения, коммунальной услуги, предоставления по требованию $(S, T, G, Q, \delta, q_0)$, где

$S = (M, \lambda)$ – метрическое пространство с метрикой $\lambda : M \times M \rightarrow R_0^+$.

$T = (Ts, \Sigma, \tau, <)$ – пространство времени с мерой и отношением строгого порядка; Ts – множество промежутков времени; Σ – σ -алгебра на Ts ; $\tau : \Sigma \rightarrow R_0^+$ – мера на Σ ; $<$ – отношение строгого порядка на T .

Сеть $G = (V, E)$ – это простой орграф без петель и кратных ребер, где V – множество вершин; E – множество ребер. Тогда $E \subseteq V \times V$ и $(u, v) \in E \Rightarrow (v, v) \notin E$ и $(v, u) \notin E$.

$Q = \{q_0, q_1, q_2, \dots\}$ – это множество состояний, с каждым $q_j = (R_{q_j}, A_{q_j}, L_{q_j}, P_{q_j})$, где $R_{q_j} : V \rightarrow R^r$ – ресурсная функция, $A_{q_j} : E \rightarrow R^r$ – функция распределения ресурсов, $L_{q_j} : V \rightarrow M$ – функция местоположения, $P_{q_j} : E \rightarrow F$ – функция цены, где F – пространство функций $F = \{f \mid f : R^r \times R_0^+ \times R_0^+ \rightarrow R\}$

$\delta : T \rightarrow Q$ – отображение перехода,

$q_0 \in Q$, где $q_0 = \delta(t_0)$.

В состав структуры экспериментальной облачной САИИ – GPSS Cloud входят следующие элементы: четыре дата-центра, на которых во время экспериментов были установлены реально работающие программные компоненты GPSS Cloud. Дата-центры располагались на момент эксперимента (2011-2013 гг.) в Казанском федеральном университете (ДЦ КФУ), Казанском научно-исследовательском университете (ДЦ КАИ), Российской академии наук (ДЦ РАН), Всероссийском заочном финансовом экономическом институте (ДЦ ВЗФЭИ). Пользователем представляемой облачной структуры были авторизованные в проекте пользователи Интернета.

Пространство S – метрическое множество, элементами которого выступают точки на поверхности Земли, с метрикой, определяемой сетевую задержку между точками. Это пространство служит для определения физического местоположения компонентов GPSS Cloud – дата-центров и пользователей. Точка в $S \subseteq R^2$ задается упорядоченной парой <широта, долгота>.

³ Wienman Joe. Axiomatic Cloud Theory (электронное издание), July 29, 2011. – Режим доступа http://www.JoeWeinman.com/Resources/Joe_Weinman_Axiomatic_Cloud_Theory.pdf (дата обращения: 15.10.2014)

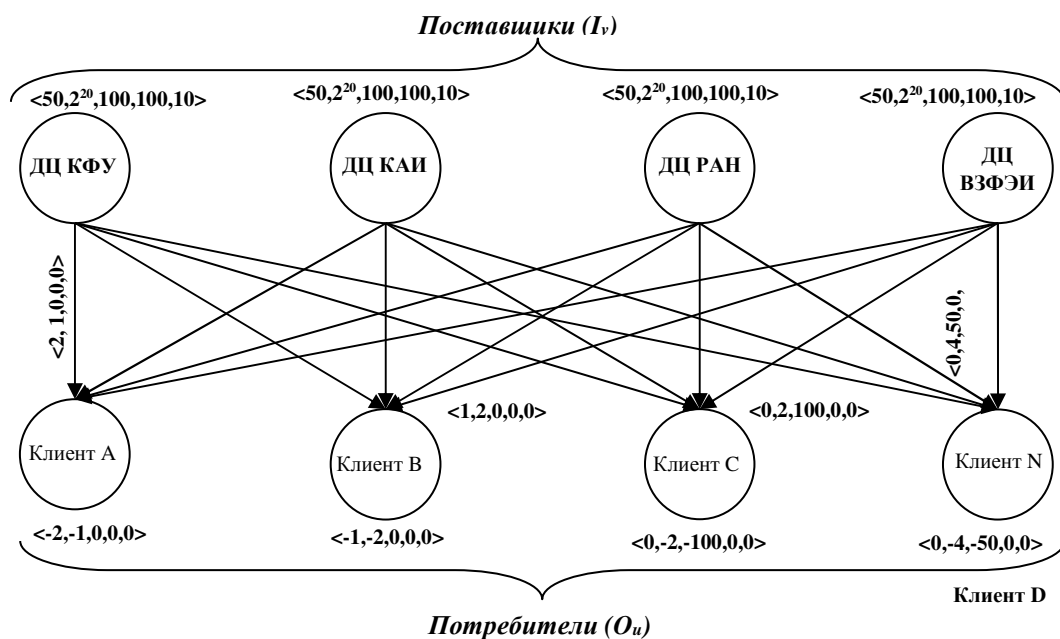
Множество T_s в определении пространства $T = (T_s, \Sigma, \tau, <)$. Оно представляет собой времена по UTC с посекундной точностью: {"23.04.2012 13:05:00", "23.04.2012 13:05:01", ..., "24.04.2012 00:00", ...}.

Сетевой оргграф $G=(V,E)$ задает облачную топологию: вершины определяют имеющиеся в наличии или запрашиваемые ресурсы, дуги – возможные пути перемещения ресурсов для удовлетворения спроса. Каждой вершине ставится в соответствие вектор ресурсов из R^r , каждое измерение которого характеризует отдельный ресурс, причем отрицательное значение свидетельствует о потребности в ресурсах.

Топология GPSS Cloud представляет двудольный граф с двумя типами вершин – «Поставщики» и «Потребители» с векторами ресурсов соответственно из R_0^+ и R_0^- . Из $(u, v) \in E$ следует, что u – предшественник v , а v – преемник u . Обозначим за I_v (Inputs – Входы) множество всех вершин-предшественников v , т.е. всех u для которых $(u, v) \in E$, а за O_u (Outputs – Выходы) – множество всех вершин-преемников u , т.е. всех v для которых $(u, v) \in E$. Приняв за положительное направление перемещения ресурсов направление «от поставщика к потребителю» получим, что I_v тождественно «Поставщикам», а O_u – «Потребителям». Каждой вершине ставится в соответствие пятерка $\langle R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 \rangle$, где, R_1 – используемая вычислительная мощность для моделирования (в условных единицах); R_2 – память для хранения результатов (в гигабайтах); R_3 – вычислительная мощность суперкомпьютерного моделирования, R_4 – вычислительная мощность для распределенного моделирования; R_5 – вычислительная мощность для прочих сервисов.

На рисунке 7 показаны выбранные для эксперимента четыре дата-центра с доступными в них ресурсами и 4 клиента с запросом на ресурсы.

В каждый момент времени облачная структура однозначно определяется своим составным состоянием $q \in Q$, включающим сведения о спросе и предложении ресурсов в каждой вершине, распределении ресурсов (удовлетворение спроса), местоположении вершин и ценовую политику. Помимо ресурсов каждой вершине ставится в соответствие ее физическое местонахождение в M , которое в случае мобильных клиентов может изменяться во времени. Цена использования облачных ресурсов для каждой дуги определяется как $p \cdot a \times \tau(t)$, где p – вектор цены; a – распределение ресурсов по дуге, “ \cdot ” – скалярное произведение векторов; $\tau(t)$ – протяженность временного интервала, определяемая мерой τ .



Источник: составлено автором.

Рисунок 7 – Сетевой оргграф облачной структуры

Использование данной формальной модели позволило рассчитать способность данной облачной структуры удовлетворить спрос на ресурсы. Анализировались различные режимы использования виртуальной лаборатории, созданной на базе дата-центров. Лаборатория включала два сервиса – сервис моделирования (GPSS) и сервис базы данных (SQL Server). Точкой входа в лабораторию служил «Сервер GPSS», осуществляющий диспетчеризацию запросов на виртуальные машины. Клиентским приложением являлся «Расширенный редактор GPSS». Варьировались расписания доступа, режимы планирования диспетчера, вычислительная сложность моделей.

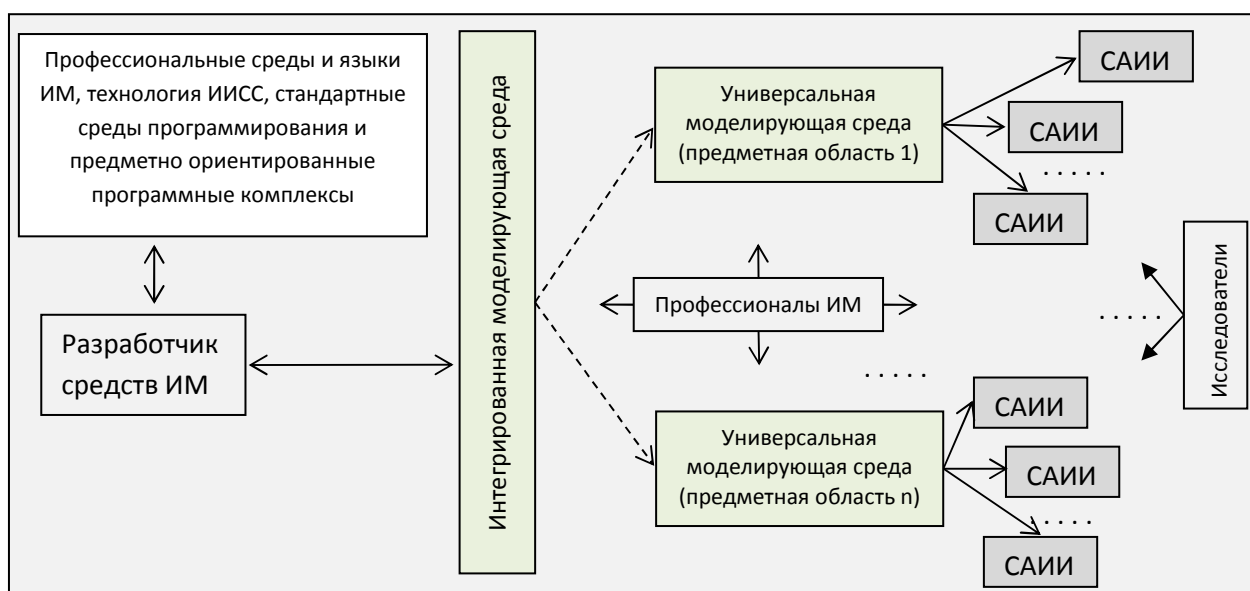
5. На основе усовершенствованной методологии проведения ИИСС и теории агрегатов Бусленко разработаны концептуальные модели трех различных предметных групп САИИ – для профессионалов ИМ ($A_{пр}$), для массового использования ($A_{м}$), для корпоративного применения ($A_{к}$).

В диссертации детализированы и подробно исследованы принципы построения систем автоматизации имитационных исследований (САИИ), их архитектура, функциональная и информационная структура. САИИ синтезируют не только этапы традиционного подхода к ИИСС. Они способны вобрать в себя также и необходимые для исследования аналитические и физические модели, различные расчеты, формы представления данных и наполнения ими моделей и способы анализа исследуемой системы.

Была поставлена задача – на основе усовершенствованной методологии проведения ИИСС сформулировать принципы реализации программных технологий

$Tech_{ин}$ и $Tech_э$ и разработать концепции массового создания САИИ. В самом общем виде результаты разработки концепции массового создания САИИ можно представить в виде структуры, изображенной на рисунке 8. Основная суть технологии состоит не только в совершенствовании универсальных языков ИМ (как было в традиционном подходе к ИИСС), но и в создании доступного для многих инженеров и специалистов программного инструментария для быстрого конструирования множества уникальных САИИ.

И это позволит создать некий эффект «снежного кома». Профессионалы ИМ совместно с программистами создают универсальный набор программных инструментов и базисных моделей, позволяющих собирать более сложные модели по принципу детского конструктора. Так как сделать это сможет практически любой инженер, то и применений этих инструментов и моделей потенциально может быть множество.



Источник: составлено автором.

Рисунок 8 – Концепции массового создания САИИ

По результатам создания усовершенствованной методологии ИИСС и с учетом возможностей современных информационных технологий в диссертации были сформулированы семь основополагающих принципов интеграции программ и организации исследования в САИИ:

1. **Централизация управления исследованием.** Т.е. в САИИ должен быть программный модуль (управляющий модуль – Pr_y), с которого начинается и заканчивается работа приложения и через который осуществляется взаимосвязь всех используемых в приложении модулей. Этот модуль является реализацией целевой функции ИИСС, состоящей из множества подцелей $G = (G_i, G_i^j)$, где $i = 1, \dots, n$ и $j =$

1, ..., m_i . В течение всего жизненного цикла исследования должно быть реализовано адаптивное управление с обратной связью – $U(t)$;

2. **Интеграция данных, моделей и результатов.** В САИИ должны быть созданы единые по структуре и организации базы исходных данных, моделей и результатов моделирования (общие для всех программ СОД);

3. **Предметная направленность языка взаимодействия исследователя с САИИ.** Язык диалога в САИИ при управлении исследованием (ЯП), для ввода исходных данных моделей и в процессе анализа результатов моделирования должен соответствовать языку предметной области исследования. Также он должен быть унифицирован для всех этапов исследования и соответствовать требованиям современных информационных технологий;

4. **Автоматическая генерация имитационных моделей.** Пользователь САИИ должен быть освобожден от разработки модели непосредственно на языке имитационного моделирования (кроме САИИ для профессионалов). САИИ должна обеспечивать автоматическую генерацию и сборку модели по введенным пользователем данным;

5. **Коллективные исследования.** Должно быть обеспечено коллективное проведение исследования. Например, одни специалисты отвечают за ввод данных, другие – за проверку адекватности, третьи – за проведение экспериментов и т.д.;

6. **Унификация сопряжения программ и данных.** Функциональное и информационное сопряжение используемых программных модулей и сервисов должно быть максимально унифицировано, синхронизировано во времени и распределено в пространстве. Это должно достигаться использованием: широко известных языков структурирования данных (например, XML); корпоративными и международными соглашениями и стандартами по взаимодействию моделей (например, HLA,);

7. **Современная архитектура вычислений.** Должно быть обеспечено проведение имитационного исследования с применением современных архитектур и технологий организации вычислений (например, облачных вычислений).

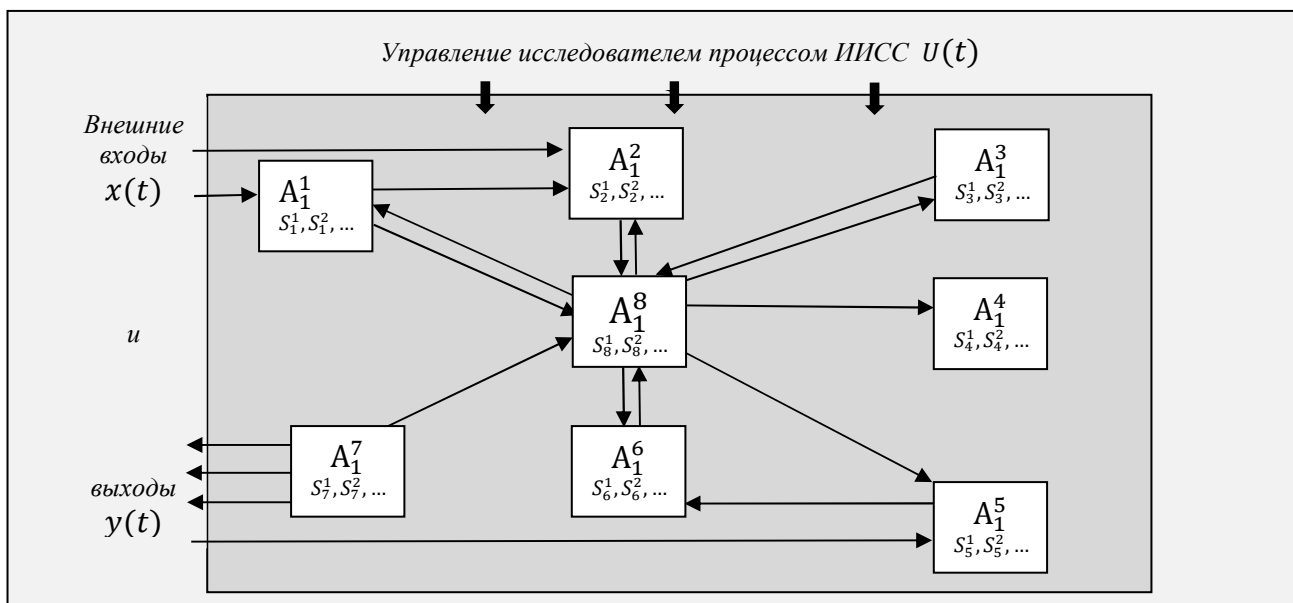
Далее, на основе данных концепций были разработаны концептуальные модели трех типов САИИ, с использованием математического аппарата агрегативных систем, предложенного Н.П. Бусленко и развитого многими учеными, например, Н.Б. Кобелевым. Результат реструктуризации процесса проведения ИИСС в САИИ для профессионалов ИМ и построения концептуальной модели, можно представить в виде агрегативной A – системы. Рассматриваемая A – система состоит из иерархического множества ТЭБ A_i^j (этап или состояние этапа исследования). Она имеет множество

связей Q , которые будем обозначать через множество пар $Q = (y_k^m, y_l^{m+s})$, где каждая пара (y_k^m, y_l^{m+s}) обозначает связь между входом в этап (или состояние этапа) x_l^{m+s} и выходом из этапа y_k^m . Множество отношений порядка P задается различными способами (принципы равноправности, приоритетности и иерархии). Целевая функция G_i для каждого агрегата A_i и A_i^j зависит от внутренних параметров $(\alpha_i$ и $\alpha_i^j)$, состояний $(S_i$ и $S_i^j)$ и определяется в виде некоторого функционала $G_i = g(\alpha_i, S_i)$ и $G_i^j = g(\alpha_i^j, S_i^j)$.

На рисунке 8 показан результат, проведенной ранее структуризации процесса. В моделирующей среде для профессионалов на первом уровне иерархии выделено восемь ТЭБ ($A=(A_1^i), i = 1, \dots, 8$) вместо 11 этапов при традиционном подходе.

ТЭБ A_1^1 – «Постановка задачи». В рамках этого этапа объединено несколько этапов традиционного подхода к ИИСС «Процесс формулировки проблемы» (S_1), «Определение границ системы» (S_2), «Формулирование модели» (S_3). Результатом этапа должно быть полное описание структуры и параметров системы, достаточное для построения модели.

ТЭБ A_1^2 – «Сбор и мониторинг данных». Это новый этап. Является первой частью этапа традиционного подхода к ИИСС «Подготовка данных» (S_4). В дополнение к программам мониторинга на данном этапе осуществляется ручной ввод недостающих данных с использованием различных программных диалогов и обеспечивается их импорт в модель.



Источник: составлено автором.

Рисунок 9 - Концептуальная модель САИИ для профессионалов

ТЭБ A_1^3 – «Анализ и обработка данных». Данный этап является второй частью этапа традиционного подхода к ИИСС «Подготовка данных» (S_4). Должен состоять из программ, реализующих процедуры наглядного (табличного и графического) анализа исходных данных, процедуры их статистической обработки и ввода результатов обработки в модель.

ТЭБ A_1^4 – «Разработка и отладка модели». В САИИ в рамках этого этапа объединены два этапа традиционного подхода к ИИСС – «Трансляция модели» и «Оценка адекватности» (S_5 и S_6). На данном этапе должны использоваться различные программные процедуры верификации модели и данных с целью оценки адекватности модели реальной системе.

ТЭБ A_1^5 – «Ввод и корректировка данных». Это дополнительный этап. Ранее в традиционном подходе к ИИСС данные для экспериментов вводились на этапе S_4 . В современных средах процессы сбора, обработки и ввода данных в модель разделены.

ТЭБ A_1^6 – «Планирование и проведение экспериментов». Объединяет три этапа традиционного подхода к ИИСС: «Тактическое планирование» (S_7), «Стратегическое планирование» (S_8) и «Экспериментирование» (S_9). Процедуры задания факторов, показателей, выбора метода планирования экспериментов и построения плана серии экспериментов должны согласовываться с целью и задачами исследования, разработанной моделью, результатами предыдущих экспериментов.

ТЭБ A_1^7 – «Анализ и обработка результатов». Также объединяет два этапа традиционного подхода к ИИСС: «Интерпретация результатов ИИСС» (S_{10}) и «Реализация результатов ИИСС» (S_{11}). Программы, реализованные на этапе, должны предоставлять множество интерактивных и полностью автоматизированных функций анализа. Конечным результатом должен стать сформированный отчет с результатами и методическими рекомендациями по оценке проектных решений в системе, их совершенствованию или модернизации всей системы.

ТЭБ A_1^8 – «База данных и результатов моделирования». Это новый элемент в структуре ИИСС, призванный интегрировать информационно все 7 этапов исследования. При работе с базой данных исследователь в процессе ИИСС может сохранить, откорректировать или взять исходные данные для моделей, посмотреть или сохранить результаты и отчет об исследовании.

Аналогичные концептуальные модели были разработаны и для двух других типов САИИ.

Результаты разработки моделей позволили сформулировать алгоритмические и программные спецификации САИИ.

6. Проведена практическая программная реализация систем автоматизации имитационных исследований (САИИ) по созданным концептуальным моделям. В рамках созданных систем автоматизации предложены алгоритмы и методика создания библиотек типов элементарных блоков (ТЭБ) для различных предметных областей.

В 2011 г. автором совместно с коллегами из ВЗФЭИ был впервые по новым концепциям реализован комплекс имитационного моделирования ИКМ.

Все ТЭБ A_i^j , используемые в концептуальных моделях, были детализированы и представлены в виде усовершенствованных ТЭБ в соответствии с общей теорией имитационного моделирования, созданной Н.Б. Кобелевым. В этой теории агрегаты называются типовыми элементарными блоками (ТЭБ). При реализации ИКМ была создана библиотека универсальных элементов – ТЭБ, позволяющая построить модели для большого числа систем. К основным характеристикам, которые необходимо задавать для ТЭБ, созданных в ИКМ, относятся:

$x_i^k(t) = \{k(t), i_k(t), \pi_{1i}^k(t), \pi_{2i}^k(t), \dots, \pi_{v_k i_k}^k(t), \dots, \pi_{v_k i_k^*}^k(t)\}$ – сигнал, поступающий на вход ТЭБ;

$y_j^k(t) = \{k(t), j_k(t), \varepsilon_{1j_k}^k(t), \varepsilon_{2j_k}^k(t), \dots, \varepsilon_{d_k j_k}^k(t), \dots, \varepsilon_{d_k j_k^*}^k(t)\}$ – выходной сигнал;

$s^k(t) = \{k(t), s_{1i_k}^k(t), s_{2i_k}^k(t), \dots, s_{\rho_k i_k}^k(t), \dots, s_{\rho_k i_k^*}^k(t); \alpha_{1i_k}^k(t), \alpha_{2i_k}^k(t), \dots, \alpha_{\rho_k i_k}^k(t), \dots, \alpha_{\rho_k i_k^*}^k(t)\}$ – состояние;

Матрица возможных состояний k-го типового блока для момента времени $t - s_{\rho_k i_k}^k(t)$;

Матрица параметров k-го типового блока для момента времени $t - \alpha_{\rho_k i_k}^k$.

Пример структурной схемы, созданной в ИКМ, приведен на рисунке 10.

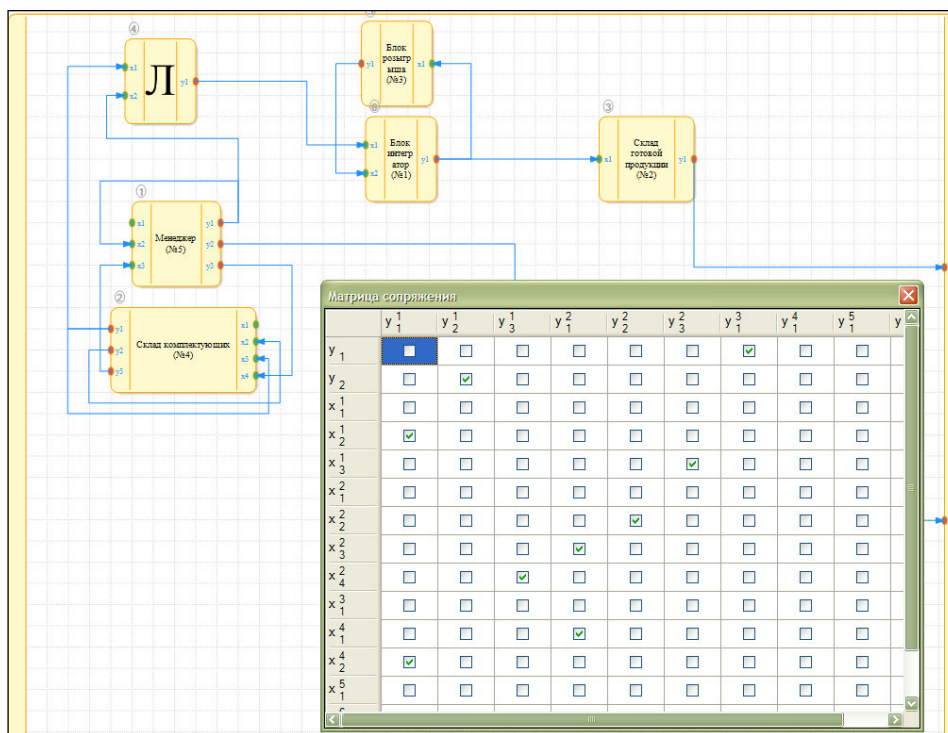
Последней и самой функционально полной реализацией идей новой методологии стала разработка расширенного редактора для профессионалов. Моделирующей основой редактора служит один из наиболее мощных и значимых языков ИМ – GPSS World. Расширенный редактор является базисом для разработки всех других типов САИИ.

Разработанная в диссертации методика создания имитационного приложения в расширенном редакторе состоит из 12 шагов, разделенных на три группы – создание САИИ данной предметной области, разработка модели выбранного объекта с использованием САИИ, генерация и использование имитационного приложения.

Создание САИИ данной предметной области:

1. Провести системный анализ предметной области с целью выделения типовых объектов и процессов, подобных структур, общих данных и т.д.;

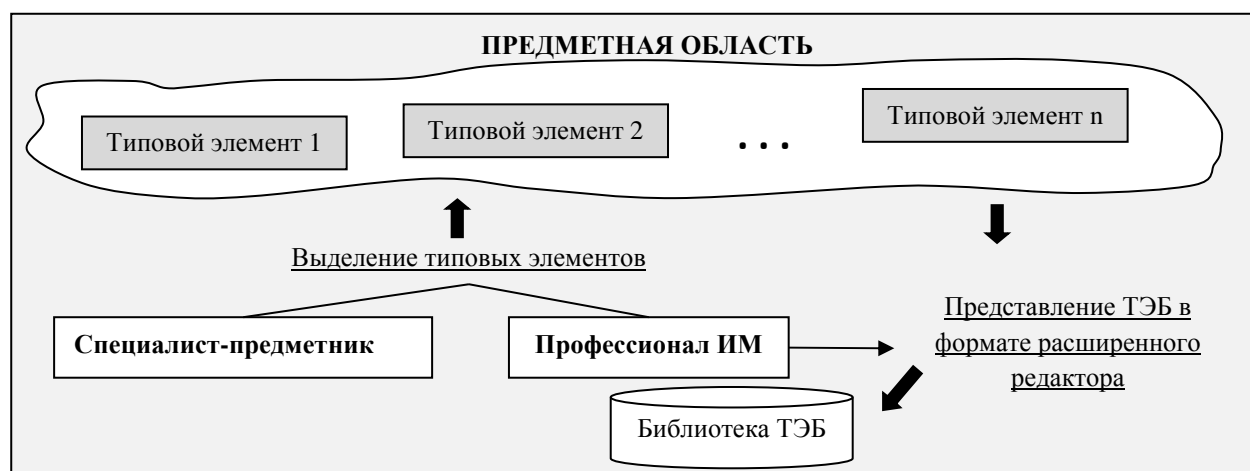
2. Создать средствами расширенного редактора библиотеку ТЭБ для данной предметной области – описать входы, выходы, состояния, реализовать логику работы с помощью GPSS модели.



Источник: Кобелев, Н.Б. Имитационное моделирование: учебное пособие/ Н.Б. Кобелев, В.В. Девятков, В.А. Половников // М.: Инфра-М, Курс, 2012. – С. 250

Рисунок 10 – Пример описания модели в ИКМ

После выполнения шагов, показанных на рисунке 11, и учитывая возможности расширенного редактора, можно сказать, что создан практический инструмент для проектирования моделей в этой предметной области без программирования на GPSS World.



Источник: составлено автором.

Рисунок 11 – Системный анализ предметной области и создание ТЭБ

Т.е. создана система, специализированная для данной предметной области. Эти шаги профессионал ИМ и специалист-предметник выполняют вместе. Без специалиста-предметника невозможно качественно провести анализ предметной области. И, наоборот, без профессионала ИМ невозможно в полной мере воспользоваться возможностями расширенного редактора GPSS World.

Разработка модели выбранного объекта с использованием САИИ:

3. Осуществить создание графической структурной схемы модели из ТЭБ с помощью редактора структурных схем и автоматически собрать модель;

4. Сконструировать диалоговые формы для ввода исходных данных модели, диалоговые формы для анализа результатов, задать основные факторы и показатели модели и графически описать сценарии анимации в модели.

Исполнять эти шаги должны совместно профессионал и предметник. Так как здесь требуется профессиональное знание созданной модели на уровне кода GPSS. А подсказать, с точки зрения исследуемой системы, правильно ли построена структурная схема, как можно назвать факторы и показатели, какую схему для анимации нужно использовать, может только специалист-предметник.

Генерация и использование имитационного приложения:

5. Осуществить автоматическую генерацию имитационного приложения в виде исполняемого файла;

6. Запустить имитационное приложение;

7. Ввести исходные данные;

8. Провести процедуры планирования одиночных экспериментов и серий экспериментов;

9. Осуществить запуск одиночных экспериментов и серий экспериментов с моделью;

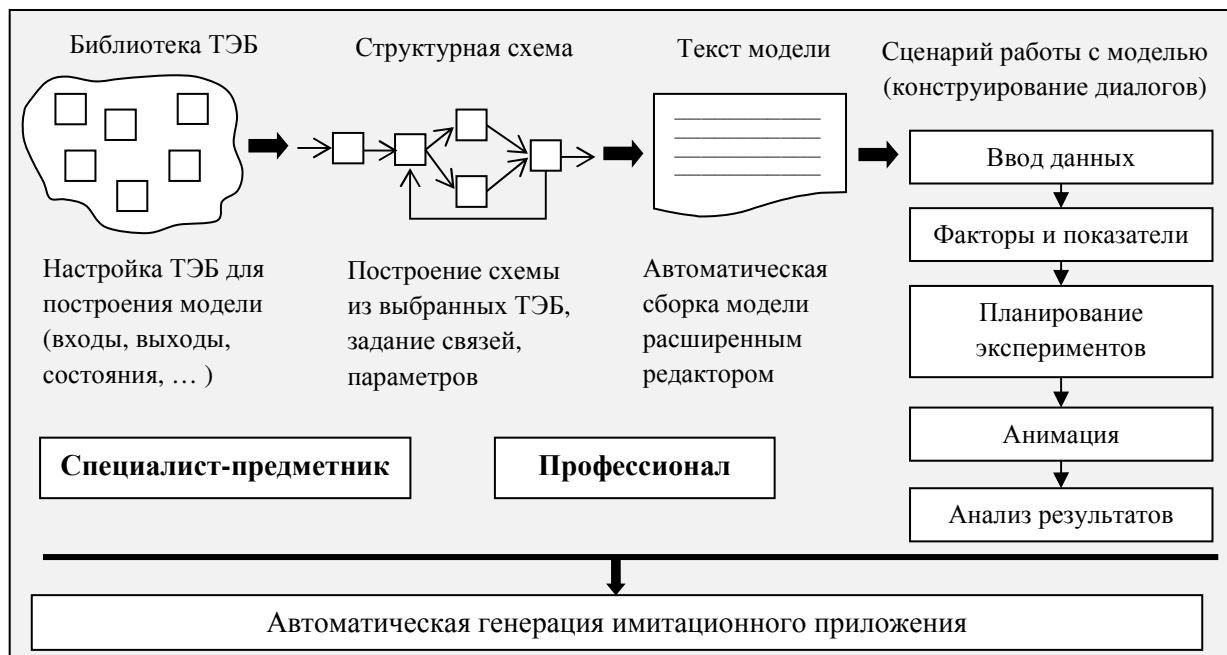
10. Провести интерактивный анализ результатов одиночных экспериментов и серий экспериментов;

11. Повторять шаги 6-9 до тех пор, пока не будет завершено исследование;

12. Сформировать отчет об исследовании.

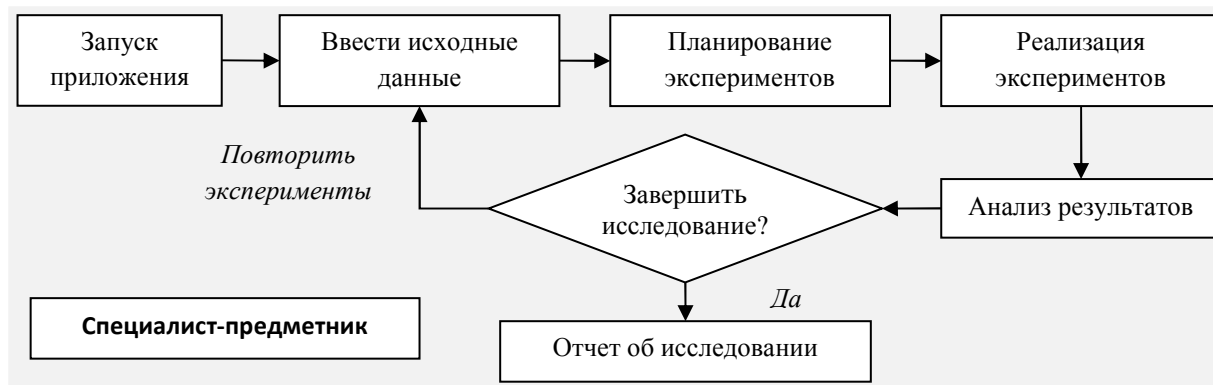
Данная методика, показанная на рисунках 12 и 13, позволяет последовательно вовлекать в процесс ИИСС все больше новых пользователей – от профессионалов ИМ, системных аналитиков предметной области до обычных инженеров и руководителей.

Все дальнейшие действия по использованию приложения для проведения ИИСС уже сможет выполнять специалист-предметник. А профессионал ИМ уже нужен только для консультации и обслуживания САИИ.



Источник: составлено автором.

Рисунок 12 – Методика создания имитационного приложения



Источник: составлено автором.

Рисунок 13 - Использование имитационного приложения

С использованием созданной методики было разработано более 10 практических имитационных приложений в области транспортной логистики, промышленного моделирования, управления воздушным движением и т.д.

Практика эксплуатации САИИ показала существенное уменьшение времени исследования (от 20 до 30%), снижение стоимости исследования. Также произошло резкое снижение квалификационных требований к исследователю. Системами моделирования, созданными по новой методологии, может воспользоваться практически любой инженер Заказчика.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации осуществлено развитие традиционной методологии ИИСС, созданы концептуальные модели систем автоматизации имитационных исследований, проведена практическая реализация имитационных приложений на основе концептуальных моделей. Результаты диссертационного исследования внедрены в работу ряда предприятий и учебный процесс нескольких университетов. Также результаты диссертации легли в основу проекта федерального закона об имитационной экспертизе.

IV. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Ключевые положения диссертационного исследования отражены в следующих основных публикациях:

Монографии

1. Девятков, В.В. Методология и технология имитационных исследований сложных систем: современное состояние и перспективы развития: монография / В.В. Девятков. – М.: Вузовский учебник.: ИНФРА-М, 2013. – 448 с. (28 п.л.).

Научные издания

2. Девятков, В.В. Расширенный редактор GPSS World – основные возможности: научное издание / В.В. Девятков. – М.: Издание ООО «Принт-сервис», 2013 г. – 143 с. (8,9 п.л.).

Статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК Минобрнауки России

3. Девятков, В.В. Имитационное моделирование в России: прошлое, настоящее, будущее / В.В. Девятков, С.А.Власов // Автоматизация в промышленности. – 2005. – №5 май. – С. 63-65. (0,4/0,2 п.л.).
4. Deviatkov, V.V. Experience in the development and application of simulation in Russia: review, analysis of prospects (Опыт разработки и применения имитационного моделирования в России: обзор, анализ и перспективы) / V.V. Deviatkov, S.A.Vlasov // Proceedings 19th European Conference on Modeling and Simulation. – Riga (Latvia): ECMS, June 1-4, 2005, P. 23-27. (0,6/0,3 п.л.).
5. Девятков, В.В. Имитационное исследование системы сервисного обслуживания программно–технических средств ОАО «Татнефть» / В.В. Девятков, В.В. Самойлов, С.А. Власов // Автоматизация в промышленности. – 2007. – № 4 апрель. – С. 11-14. (0,5/0,17 п.л.).
6. Девятков, В.В. Универсальная моделирующая среда для разработки имитационных приложений / В.В. Девятков, С.А. Власов, Т.В. Девятков // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2009. – №2/2009. – С. 5-12. (0,9/0,3 п.л.).
7. Deviatkov, V.V. Creation Principals of Universal Modeling Environment for Simulation Application Development (Принципы разработки универсальной моделирующей среды при создании имитационных приложений) / V.V. Deviatkov, S.A. Vlasov, T.V. Deviatkov // Preprints 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM'09), Volume 13. – Part 1 **. – Moscow (Russia): IFAC, June 3-5, 2009. – P. 1814-1819. (0,81/0,27 п.л.).
8. Девятков, В.В. Использование имитационных моделей для оценки производственной мощности при управлении металлургическим производством / В.В. Девятков,

- С.А. Власов, Д.И. Усанов // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 7 июль. – С. 8-13. (0,73/0,24 п.л.).
9. Девятков, В.В. Проблемы и возможности создания систем имитационного моделирования для СУПЕР ЭВМ на основе развития российских разработок и совершенствования подготовки специалистов / В.В. Девятков, С.А. Власов, Н.Б. Кобелев // Экономика. Налоги. Право. – 2010. – № 5. – С. 11-18. (0,81/0,27 п.л.).
 10. Девятков, В.В. Мир имитационного моделирования: взгляд из России / В.В. Девятков // Прикладная информатика. – 2011. – № 4 (34). – С. 9-29. (1,72 п.л.).
 11. Девятков, В.В. Имитационные исследования с использованием GPSS WORLD – новые возможности / В.В. Девятков, С.А. Власов, Ф.В. Исаев, М.В. Федотов // Автоматизация в промышленности. – №7. – 2012. – С. 3-8. (0,7/0,17 п.л.).
 12. Девятков, В.В. Поддержка принятия управленческих решений на основе интеллектуальной обработки и анализа данных мониторинга деятельности компании ОАО «РЖД» [Электронный ресурс] / В.В. Девятков, А.В. Ахметзянов, Н.Н. Бахтадзе, С.А. Власов, Е.М. Максимов // Управление большими системами сборник трудов [Электронный ресурс]. – 2012. – Выпуск 38. –С. 36-50. – Режим доступа: <http://ubs.mtas.ru/upload/library/UBS3803.pdf> Дата обращения: 29.07.2014 г. (1/0,2 п.л.).
 13. Devyatkov, V.V. Cloud Technology in Simulation Studies: GPSS Cloud Project (Облачные технологии в имитационных исследованиях: Проект GPSS Cloud) / V.V. Devyatkov, S.A. Vlasov, T.V. Devyatkov // Proceedings of the 7th IFAC Conference on Manufacturing Modeling, Management, and Control. – Saint Petersburg (Russia): IFAC, June 19-21, 2013. – Volume 7. – Part 1. – P. 637-641. (0,66/0,22 п.л.).
 14. Девятков, В.В. Имитационное моделирование в задачах пропускной способности железных дорог / В.В. Девятков, С.А. Власов, Т.В. Девятков, И.А. Кузнецов, В.Л. Павлов и др. // Автоматизация в промышленности. – 2013. – №7 июль. – С. 47-49. (0,42/0,08 п.л.).
 15. Deviatkov, V.V. Imitational Studies with GPSS WORLD: New Capabilities (Имитационные исследования с GPSS WORLD: новые возможности) / V.V. Deviatkov, S.A. Vlasov, F. V. Isaev, and M. V. Fedotov // Automation and Remote Control. – 2014. – Vol. 72. – No. 3. – P. 345-354 (1,0/0,25 п.л.).
 16. Девятков, В.В. Имитационная экспертиза: опыт применения и перспективы / В.В. Девятков, С.А. Власов, М.М. Назмеев // Прикладная информатика. – 2014. – № 1 (49). – С. 66-74. (0,9/0,3 п.л.).
 17. Девятков, В.В. Применение системы GPSS World при проектировании и модернизации судосборочных комплексов в составе современных судостроительных верфей / В.В. Девятков, М.В. Федотов, М.А. Долматов, В.А. Коренько, М.А. Долматов // Прикладная информатика. – 2014. – № 2 (50). – С. 103-108. (0,6/0,12 п.л.).
 18. Девятков, В.В. Облачное моделирование для проведения имитационных исследований с применением GPSS World / В.В. Девятков // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 7 июль. – С. 54-57. (0,56 п.л.).
 19. Девятков, В.В. Имитационное моделирование системы сервисного обслуживания в нефтегазовой компании / В.В. Девятков // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2014. – № 8/2014. – С. 31-37. (0,8 п.л.).
 20. Девятков, В.В. Некоторые вопросы методологии имитационных исследований / В.В. Девятков // Прикладная информатика. – 2014. – № 4 (52). – С. 81-88. (0,7 п.л.).
 21. Девятков, В.В. Эволюция и развитие методологии имитационных исследований / В.В. Девятков // Ученые записки Санкт-Петербургского университета управления и экономики. – 2014. – № 3 (47). – С. 17-25. (0,8 п.л.).
 22. Девятков, В.В. Системный анализ и имитационные исследования транспортной системы Универсиады 2013 в Казани / В.В. Девятков // Транспортное дело России. – 2014. – № 4 (113). – С. 24-27. (0,75 п.л.).
 23. Девятков, В.В. Массовая разработка имитационных приложений с применением «Расширенного редактора GPSS World» [Электронный научный журнал] / В.В. Девятков // Управление экономическими системами. – 2014. – № 10 /2014 (70) УЭКС. – Режим

доступа: <http://www.uecs.ru/instrumentalnii-metody-ekonomiki/item/3066--l-gpss-worldr> (дата обращения: 24.10.2014) (0,7 п.л.).

24. Девятков, В.В. Исследование транспортной логистики Агропромышленного парка Республики Татарстан / В.В. Девятков // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 10 октябрь. – С. 58-62. (0,7 п.л.).
25. Девятков, В.В. Системный анализ и имитационные исследования предприятий нефтехимического комплекса / В.В. Девятков // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2014. – № 10 октябрь. – С. 19-24. (0,71 п.л.).
26. Девятков, В.В. Развитие методологии и технологии имитационных исследований сложных систем / В.В. Девятков // Труды СПИИРАН. – 2014. – Вып. 5(36). – С. 44-58. (0,9 п.л.).

Научные публикации в других научных изданиях и журналах

27. Девятков, В.В. Пакет имитационного моделирования дискретных систем на Фортране / В.В. Девятков, И.М. Якимов, В.М. Трегубов // Вычислительная техника социалистических стран: сборник статей. – М.: Финансы и статистика, 1989. – Выпуск 25. – С. 116-122. (0,4/0,1 п.л.).
28. Девятков, В.В. Предсказание погоды / В.В. Девятков, К.В. Кудашов // Компьютера. – 2003. – №21 (496) июнь. – С. 32-34. (0,62/0,31 п.л.).
29. Девятков, В.В. Практическое применение имитационного моделирования в России и странах СНГ: обзор, анализ перспектив / В.В. Девятков // Первая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика. ИММОД-2003»: сборник докладов. – СПб.: ФГУП ЦНИТИ ТС, 2003. – том 1. – С. 15-18. (0,42 п.л.).
30. Девятков, В.В. Разработка приложений в среде GPSS World / В.В. Девятков // Вторая всероссийская научно-практическая «Имитационное моделирование. Теория и практика. ИММОД-2005»: сборник докладов. – СПб.: ФГУП ЦНИТИ ТС, 2005. – том 1. – С. 186-190. (0,6 п.л.).
31. Девятков, В.В. Имитационное моделирование – от виртуальных возможностей к объективной необходимости / В.В. Девятков, С.А. Власов // Труды второй Международной конференции «Системный анализ и информационные технологии» САИТ-2007. – М.: ЛКИ, 2007 г. – том 2. – С. 14-15. (0,15/0,08 п.л.).
32. Девятков, В.В. Методология, технология и принципы программной реализации имитационных приложений / В.В. Девятков, С.А. Власов, Н.Б. Кобелев // Третья всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика. ИММОД-2007»: сборник докладов. – СПб.: ФГУП ЦНИИ ТС. – Том 1. – С.17-26. (1,2/0,4 п.л.).
33. Девятков, В.В. Имитационное моделирование, как основной способ поддержки принятия решений в современном мире. Об организации имитационных исследований в России / В.В. Девятков, Н.Б. Кобелев, В.А. Емельянов, А.М. Плотников // Третья всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика. ИММОД-2007»: сборник докладов. – СПб.: ФГУП ЦНИИ ТС. – Том 1. – С. 37-45. (1,2/0,3 п.л.).
34. Девятков, В.В. Концепции и методы разработки распределенных имитационных приложений с использованием GPSS World / В.В. Девятков, С.А. Власов, Т.В. Девятков // Информационные технологии и математическое моделирование систем 2008 – 2009. Труды международной научно-технической конференции. – М.: Радиотехника, 2009. – С. 19-26. (0,3/0,1 п.л.).
35. Девятков, В.В. Язык моделирования GPSS World и системы автоматизации имитационных исследований: опыт применения и перспективы использования / В.В. Девятков, С.А. Власов, Т.В. Девятков // Четвертая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика»: сборник докладов. – СПб.: ФГУП ЦНИИ ТС, 2009. – Том 1. – С.11-18. (0,9/0,3 п.л.).

36. Девятков, В.В. Имитационное моделирование больших систем / В.В. Девятков, С.А. Власов, Н.Б. Кобелев, В.А. Половников // Четвертая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика»: сборник докладов. – СПб.: ФГУП ЦНИИ ТС, 2009. – Том 1. – С.104-108. (0,6/0,15 п.л.).
37. Девятков, В.В. Структурная оптимизация программно-аппаратного комплекса виртуальных лабораторий с применением методов имитационного моделирования и нечеткой логики / В.В. Девятков, Д.В. Жевнерчук, А.В. Николаев // Четвертая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика»: сборник докладов. – СПб.: ФГУП ЦНИИ ТС, 2009. – Том 1. – С. 246-250. (0,6/0,2 п.л.).
38. Девятков, В.В. Имитационное моделирование как антикризисное средство уменьшения издержек предприятий / В.В. Девятков, В.А. Половников, Н.Б. Кобелев, Т.В. Девятков // Материалы международной научно-практической конференции «Инновационный путь развития РФ как важнейшее условие преодоление мирового финансово-экономического кризиса». – М.: ВЗФЭИ, 2009. – С. 176-181. (0,7/0,18 п.л.).
39. Девятков, В.В. Разработка и применение имитационных приложений для прогнозирования функционирования и развития системы сервисного обслуживания АСУ ОАО «Татнефть» / В.В. Девятков, С.А. Власов, Т.В. Девятков, В.В.Самойлов // Информационные технологии и математическое моделирование систем 2009-2010. Труды международной научно-технической конференции. – М.: ФГБУН Центр информационных технологий в проектировании Российской академии наук, 2010. – С. 66-77. (0,7/0,17 п.л.).
40. Девятков, В.В. Проблемы и возможности создания пакета прикладных программ имитационного моделирования для супер-ЭВМ на основе российских разработок в области имитационного моделирования / В.В. Девятков, С.А. Власов, Т.В. Девятков, Н.Б. Кобелев // Информационные технологии и математическое моделирование систем 2009-2010. Труды международной научно-технической конференции. – М.: ФГБУН Центр информационных технологий в проектировании Российской академии наук, 2010. – С.77-86. (0,6/0,15 п.л.).
41. Девятков, В.В. Разработка имитационного приложения для MES - системы завода ферросплавов / В.В. Девятков, С.А. Власов, Д.И. Усанов, С.В. Кравцов // Информационные технологии и математическое моделирование систем 2011. Труды международной научно-технической конференции. – М.: ФГБУН Центр информационных технологий в проектировании Российской академии наук, 2011. – С. 31-33. (0,3/0,1 п.л.).
42. Девятков, В.В. Имитационные исследования: от классических технологий до облачных вычислений / В.В. Девятков, С.А. Власов, Н.Б. Кобелев // Пятая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика»: сборник докладов. – СПб.: ОАО ЦТСС, 2011. – Том 1. – С. 42-50. (1/0,33 п.л.).
43. Девятков, В.В. Расширенный редактор GPSS World / В.В. Девятков, М.В. Федотов // Пятая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика»: сборник докладов. – СПб.: ОАО ЦТСС, 2011. – Том 1. – С. 355-359. (0,6/0,3 п.л.).
44. Девятков, В.В. Универсальный редактор форм для моделей на GPSS World / В.В. Девятков, Ф.В. Исаев // Пятая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика»: сборник докладов. – СПб.: ОАО ЦТСС, 2011. – Том 1. – С. 350-354. (0,6/0,3 п.л.).
45. Девятков, В.В. Применение универсальной системы имитационного моделирования GPSS World при проектировании судосборочных комплексов в составе современных судостроительных верфей / В.В. Девятков, М.В. Федотов, М.А. Долматов, Р.С. Нисенбаум // Международная научно-практическая конференция «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» – «ИКМ МТМТС 2011»: труды конференции. – СПб.: ОАО ЦТСС, 2011. – С. 59-63. (0,38/0,09 п.л.).

46. Девятков, В.В. Элементы методологии общей теории имитационного моделирования / В.В. Девятков, С.А. Власов, Н.Б. Кобелев, А.М. Плотников // Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию социально-экономических систем: труды конференции. – М.: ВЗФЭИ, 2012. – С. 9-18. (1,0/0,25 п.л.).
47. Девятков, В.В. Имитационные исследования: современное состояние и перспективы развития / В.В. Девятков, В.В. Угрозов // Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию социально-экономических систем: труды конференции. – М.: ВЗФЭИ, 2012. – С. 39-43. (0,6/0,3 п.л.).
48. Девятков, В.В. САИИ для профессионалов – расширенный редактор GPSS World / В.В. Девятков, М.В. Федотов // Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию социально-экономических систем: труды конференции. – М.: ВЗФЭИ, 2012. – С. 114-119. (0,6/0,3 п.л.).
49. Девятков, В.В. Применение облачных технологий в имитационных исследованиях: Проект GPSS / В.В. Девятков, В.В. Александров, С.А. Власов // Информационные технологии и математическое моделирование систем 2012. Труды международной научно-технической конференции. – М.: ФГБУН Центр информационных технологий в проектировании Российской академии наук, 2012. – С. 40-46. (0,4/0,13 п.л.).
50. Девятков, В.В. Разработка имитационной модели железнодорожного направления, входящей в состав СППР, на новых программно-методологических принципах / В.В. Девятков, С.А. Власов, Т.В. Девятков, В.Л. Павлов, В.И. Уманский // Техника и технология. – 2013. – №2 (55). – С. 19-22. (0,3/0,06 п.л.).
51. Девятков, В.В. Развитие СППР по оценке пропускных способностей железных дорог в рамках архитектуры GPSS Cloud / В.В. Девятков, С.А. Власов, Т.В. Девятков, В.Л. Павлов, В.И. Уманский // Техника и технология. – 2013. – №2 (55). – С. 14-18. (0,37/0,07 п.л.).
52. Девятков, В.В. Интеллектуальные мультиагентные информационно-управляющие системы ОАО «РЖД» на основе предсказательного моделирования и систем автоматизации имитационных исследований облачного типа / В.В. Девятков, С.Н. Васильев, А.В. Ахметзянов, Н.Н. Бахтадзе, С.А. Власов // Фундаментальные исследования для долгосрочного развития железнодорожного транспорта. Сборник трудов членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО РЖД. – М.: Интекст, 2013. – С. 38-44. (0,5/0,08 п.л.).
53. Девятков, В.В. САИИ для профессионалов – Развитие возможностей расширенного редактора GPSS World / В.В. Девятков, М.В. Федотов // Материалы шестой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2013. – Казань: Изд-во ФЭН Академии наук РТ, 2013. – Том 1. – С. 356-360. (0,5/0,25 п.л.).
54. Девятков, В.В. Основные возможности универсального редактора форм для GPSS World / В.В. Девятков, Ф.В. Исаев // Материалы шестой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2013. – Казань: Изд-во ФЭН Академии наук РТ, 2013. – Том 2. – С. 149-154. (0,6/0,3 п.л.).
55. Девятков, В.В. Имитационные исследования транспортной логистики Универсиады 2013 в Казани / В.В. Девятков, А.А. Галиахметов, Т.В. Девятков, М.М. Назмеев // Материалы шестой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2013. – Казань: Изд-во ФЭН Академии наук РТ, 2013. – Том 2. – С. 84-89. (0,6/0,12 п.л.).
56. Девятков, В.В. Имитационное моделирование горно-обогатительного производства / В.В. Девятков, В.Ю. Горошков, Е.А. Нифантьев, М.В. Федотов // Материалы шестой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2013. – Казань: Изд-во ФЭН Академии наук РТ, 2013. – Том 2. – С. 95-99. (0,6/0,15 п.л.).