

На правах рукописи

Аничкин Антон Сергеевич

**ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ СРЕДА ДЛЯ
РАЗРАБОТКИ ПРИЛОЖЕНИЙ ТЕОРИИ
РАСПИСАНИЙ**

Специальность 05.13.11

Математическое и программное обеспечение вычислительных машин,
комплексов и компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт системного программирования им. В.П. Иванникова Российской академии наук (ИСП РАН).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Семенов Виталий Адольфович

Официальные оппоненты: **Горбунов-Посадов Михаил Михайлович**
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, заведующий отделом
Информационных технологий Института
прикладной математики им. М.В.Келдыша
Российской академии наук

Топорков Виктор Васильевич
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой Вычислительной техники Федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Национальный
исследовательский университет "МЭИ"»

Ведущая организация: Межведомственный суперкомпьютерный центр
Российской академии наук — филиал Федерального
государственного учреждения «Федеральный научный
центр Научно-исследовательский институт системных
исследований Российской академии наук»

Защита диссертации состоится **«19» апреля 2018 года в 15 часов** на заседании диссертационного совета Д 002.087.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт системного программирования им. В.П. Иванникова Российской академии наук по адресу: 109004, г. Москва, ул. Александра Солженицына, д. 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт системного программирования им. В.П. Иванникова Российской академии наук.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук

/Зеленов С.В./

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Теория расписаний находит широкое применение в научных и индустриальных областях, связанных с управлением вычислительными ресурсами, планированием проектной деятельности, управлением производством, организацией транспортных потоков, диспетчеризацией воздушного сообщения. Однако многообразие существующих математических моделей и вычислительных методов, а также перманентное появление новых моделей и методов порождает острую проблему разработки и развития программных приложений теории расписаний на единой методологической и инструментальной основе.

Использование математических библиотек общего назначения (MathCAD, MATLAB), специализированных библиотек для составления расписаний (PSPLIB, LibRCPS, MPSPLib) или систем проектного планирования (Oracle Primavera, MS Project, Synchro, Spider Project, Gemini, Merlin, Zoho Projects, ManagePro, Smartsheet, GanttPro, Asana, Acunote, Teamweek, Bitrix24, Jira, Isetia) для подобных целей оказывается невозможным или крайне неэффективным из-за особенностей прикладных задач. В самом деле, классические постановки «открытой линии», «рабочего цеха» или «поточковой линии», имеющие полиномиальную сложность при небольшом числе машин, простых моделях обслуживания и отсутствии директивных сроков, не следует решать как общие задачи проектного планирования (Resource-Constrained Project Scheduling Problem; RCPSP), являющиеся NP-полными.

С другой стороны, принятая практика разработки специализированных приложений планирования (например, Planets, Atlas, Moses, Cosytec, Forwards TAP-AI, Optiservice, Mosar, Cobra, SAS-Pilot, STP, Popular) часто является неприемлемой в силу чрезмерных затрат на разработку и сопровождение. Адаптация унаследованных открытых кодов, изначально не предназначенных для подобных целей и не предусматривающих возможности их развития и повторного использования, малоэффективна даже для разработки программ близкой функциональности.

В связи с этим актуальным представляется создание единой инструментальной среды для программной реализации приложений теории расписаний. Подобная среда должна предоставлять средства для разработки новых программ на основе ранее реализованных компонентов. При этом возможности развития, адаптации и конфигурирования компонентов должны обеспечивать построение программ составления расписаний, релевантных условиям и вычислительной сложности решаемых прикладных задач.

Цель и задачи работы

Главной целью диссертационной работы является разработка и экспериментальное исследование инструментальной среды для программной реализации моделей, методов и приложений теории расписаний. Организация инструментальной среды в виде объектно-ориентированного каркаса позволит существенно сократить затраты на разработку приложений, а также обеспечить их высокую производительность при решении актуальных промышленных задач высокой размерности.

Для достижения декларируемой цели были поставлены следующие научные и практические задачи:

- выделить широкий класс задач теории расписаний, допускающий обобщённую программную реализацию средств решения в составе инструментальной среды;
- математически обосновать использование данного класса задач путём формулировки и доказательства условий существования решений, возможности их поиска с помощью точных и приближённых алгоритмов;
- провести объектно-ориентированный анализ предметных областей, связанных с теорией расписаний и проектным планированием, и на его основе спроектировать и реализовать на языке Си++ инструментальную среду. К среде предъявляются требования универсальности (наличие готовых к использованию программных компонентов для решения типовых задач теории расписаний), высокой производительности при решении промышленно значимых задач высокой размерности и гибкости (возможность повторного использования программных компонентов при создании новых приложений с низкими затратами на доработку);
- провести экспериментальное исследование инструментальной среды при создании, сопровождении и развитии целевой системы визуального моделирования и планирования проектов, а также выработать общие методологические рекомендации для построения приложений в других предметных областях.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы заключается в получении следующих оригинальных результатов:

- предложен и математически формализован класс задач обобщённого проектного планирования (Generally Constrained Project Scheduling Problem — GCPSP), охватывающий задачи теории расписаний и проектного планирования в расширенных постановках. GCPSP задача ставится как оптимизационная задача на множестве решений, локально согласованных с эквивалентной системой ограничений с приоритетами;

- доказаны конструктивные теоремы о существовании решения задач в классе GCPSР, о сводимости классических постановок теории расписаний к задачам данного класса, а также о возможности их точного и приближённого решения на основе предложенного обобщённого алгоритма;
- разработана объектно-ориентированная среда, предусматривающая инструментальные возможности для программной реализации моделей, методов и приложений теории расписаний, а также предоставляющая средства решения индустриальных задач высокой размерности;
- разработан метод построения и инкрементального развития приложений теории расписаний на основе объектно-ориентированной среды.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в определении и математической формализации класса задач обобщённого проектного планирования, в формулировке и доказательстве утверждений о существовании решения и о сводимости классических постановок к задачам данного класса. Теоретическую значимость имеет также разработанный метод построения и инкрементального развития приложений теории расписаний на основе объектно-ориентированной среды.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности применения инструментальной среды для разработки программных приложений теории расписаний в различных научных и индустриальных областях. Открытая архитектура объектно-ориентированной среды, развитый набор компонентов для задания условий и решения типовых задач, а также предусмотренные инструментальные возможности обеспечивают построение эффективных целевых приложений при относительно низких затратах.

Объектно-ориентированная среда успешно прошла экспериментальное исследование в ходе создания, многолетнего сопровождения и развития системы визуального моделирования и планирования индустриальных проектов. Данная коммерческая система внедрена более чем в трёх сотнях ведущих индустриальных компаний в тридцати шести странах мира, в том числе, и в Российской Федерации. Использование среды позволило относительно просто реализовать типовые средства проектного планирования, а в дальнейшем — развить их с учетом временных, пространственных, ресурсных, финансовых и логистических факторов. Как результат, существенно расширились функциональные возможности системы для достоверного планирования технологически сложных проектов и масштабных индустриальных программ.

Методология и методы исследования

Результаты диссертационной работы, связанные с математической формализацией и исследованием класса обобщенного проектного планирования, получены на основе теории расписаний. Проектирование и разработка инструментальной среды для реализации приложений теории расписаний осуществлялись в рамках методологии объектно-ориентированного программирования.

Положения, выносимые на защиту

- Задачи обобщённого проектного планирования GCPSP и методы их решения.
- Объектно-ориентированная среда для построения и развития приложений теории расписаний.
- Метод построения и инкрементального развития приложений на основе предложенной объектно-ориентированной среды.

Апробация работы

Основные положения и результаты настоящей диссертационной работы обсуждались и докладывались на следующих российских и международных научных конференциях:

- конференция, посвященная 80-летию со дня рождения академика В.А. Мельникова, Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской академии наук, Москва, Россия, 2009 г.;
- XXXVI международная конференция «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе» IT + SE'09, весенняя сессия, Ялта-Гурзуф, Крым, Украина, 20 – 30 мая 2009 г.;
- международная конференция «20th ISPE International Conference on Concurrent Engineering», Мельбурн, Австралия, 2013 г.;
- международная конференция «13th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality (CONVR)», Лондон, Великобритания, 2013 г.;
- XLIV международная конференция «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе» IT + S&E'15, весенняя сессия, Ялта-Гурзуф, Крым, Россия, 22 мая – 01 июня 2015 г.;
- XX Байкальская Всероссийская конференция с международным участием, школа-семинар научной молодёжи, «Информационные и математические технологии в науке и управлении», Байкальская сессия, 1 – 7 июля 2015 г.;
- XLVI международная конференция «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе» IT + S&E'17, весенняя сессия, Ялта-Гурзуф, Крым, Россия, 22 мая – 01 июня 2017 г.;

— семинар «Объектно-ориентированная среда для разработки приложений теории расписаний», Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук, Москва, Россия, 7 декабря 2017 г.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 13 работ, в том числе 6 статей [1, 2, 3, 4, 5, 6] в реферируемых научных журналах из списка изданий, рекомендованных ВАК РФ. Работа [1] опубликована в книге, индексируемой Web of Science.

В работах [3, 4, 5, 7, 8] все научные результаты принадлежат автору. Научным руководителем Семеновым В.А. осуществлялась постановка и формализация задач, а также проводились редакторские правки. В работе [1] автором исследована постановка задачи проектного планирования с учётом пространственных факторов. В работе [2] автором предложена обобщенная вычислительная схема, в рамках которой могут быть реализованы как точные, так и приближенные алгоритмы поиска расписаний. Личное участие в разработке целевой системы визуального моделирования и планирования проектов отражено в работе [6], в которой автором также выполнен сравнительный анализ производительности целевого приложения.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертационной работе результаты получены автором лично.

Объем и структура диссертации

Представленная диссертационная работа состоит из введения, четырех глав основного содержания, заключения, библиографического списка, состоящего из 207 публикаций. Общий объем работы составляет 168 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, а также описаны цели и основные задачи работы.

Глава 1 посвящена основным понятиям и разделам теории расписаний и проектного планирования. Главное внимание уделяется моделям и методам, используемым при решении класса задач RCPSР (Resource-Constrained Project Scheduling Problem). Данный класс задач, с одной стороны, находит широкое практическое применение, а с другой стороны — обобщает математические постановки, возникающие в близких предметных областях и дисциплинах.

Отмечается, что задачи поиска критических путей и критических цепочек, постановок «открытая линия», «рабочий цех» и «поточковая линия», а также задачи с директивными сроками являются частными случаями RCPSP-задач планирования. Примечательно, что к данному классу естественным образом редуцируются задачи о линейной и двумерной упаковке в контейнеры, задачи «О рюкзаке», а также классическая задача «О коммивояжере». Таким образом, обсуждаемый класс задач приобретает особое значение в контексте проводимой систематизации и концептуализации задач проектного планирования, а также в связи с разработкой универсального объектно-ориентированного каркаса для обобщённой программной реализации моделей и методов теории расписаний.

В силу отмеченной общности класса задач RCPSP далее в диссертационной работе используется терминология проектного планирования. Термин «работа» употребляется вместо понятий «требование», «активность», «процесс» и/или «операция», а «обобщённый ресурс» — вместо «машина» и/или «станок».

Далее в главе рассматривается классическая постановка задачи проектного планирования и приводится её математическая формализация. Обсуждаются расширенные постановки задач, порождаемые альтернативными моделями ресурсов, моделями исполнения работ, временными ограничениями разных видов и целевыми функциями. Для каждой рассматриваемой модели указываются её достоинства и недостатки, а также определяются области её применимости. Особое внимание уделяется вопросам общности моделей, которые являются принципиально важными для проектирования средств объектно-ориентированного каркаса.

Рассматриваются также методы решения типовых задач проектного планирования. Как правило, выделяют точные методы, которые обеспечивают построение оптимального расписания в соответствии с выбранной целевой функцией, а также приближённые методы, которые ограничивают область поиска согласованных расписаний в результате применения эвристических правил. Первую группу составляют метод прямого перебора, метод «ветвей и границ», метод линейного программирования, метод динамического программирования и метод декомпозиции. В силу NP-полноты класса задач RCPSP точные методы требуют значительных вычислительных ресурсов, что ограничивает их применение небольшими проектами, состоящими из нескольких десятков работ. При планировании реальных промышленных проектов, представленных десятками тысяч работ, единственно возможным является использование приближённых методов. К ним следует отнести метод Монте-Карло, метод частичного перебора, метод направленного перебора, упрощённый метод «ветвей и границ», а также современные методы последовательного и параллельного составления расписаний на основе эвристических правил. Существенными недостатками приближённых методов

являются неопределенность качества найденного решения и его зависимость от применяемых методов и комбинаций эвристик.

Глава 2 посвящена математической формализации класса задач обобщённого проектного планирования. В качестве отправной точки рассматривается классическая постановка RCPSP-задачи:

$$\begin{aligned} & \min \left(\max_{i=1, \dots, N} (x_i + d_i) \right) \\ & \text{при } x_i \geq t_0, i = 1, \dots, N \\ & x_{i^{(l)}} + d_{i^{(l)}} \leq x_{i^{(l)}}, l = 1, 2, \dots, L \\ & \forall t \geq t_0 \text{ имеет место } \sum_{i \in I(t,r)} q_{i,r} \leq Q_r, r = 1, 2, \dots, R \end{aligned}$$

где N — количество работ в проекте, d_i — продолжительность выполнения i -ой работы, t_0 — минимально допустимое время начала выполнения проекта, L — количество технологических связей в проекте, $i^{(l)}$ — индекс работы-предшественника, участвующего в связи l , $i^{(l)}$ — индекс работы-последователя, R — количество различных ресурсов в проекте, $Q_r > 0$ — доступное количество r -ого ресурса, $q_{i,r}$ — количество r -ого ресурса, потребляемого i -ой работой, $I(t,r) = \{i = 1, \dots, n \mid x_i \leq t < x_i + d_i \ \& \ q_{i,r} \neq 0\}$ — множество индексов всех работ, выполняемых в момент времени $t \geq t_0$ и использующих ресурс r . Неизвестные переменные в постановке задачи обычно целочисленные, поскольку на практике используется дискретное представление временных параметров. Задача считается корректно поставленной, если заданные связи не образуют циклов и уровни потребления ресурсов индивидуальными работами не превышают их общедоступное количество. В противном случае система алгебраических ограничений может оказаться переопределенной, а задача не иметь решения.

Далее в главе описывается и приводится на псевдокоде алгоритм последовательной диспетчеризации, обычно рекомендуемый для поиска приближённого решения RCPSP-задачи.

Несмотря на то, что приведенные математическая постановка и алгоритм решения являются классическими для теории расписаний, они имеют ряд принципиальных ограничений для широкого практического использования. В данной главе диссертационной работы рассматриваются многочисленные расширенные постановки задач проектного планирования, встречаемые на практике. В данных постановках допускается задание альтернативных моделей исполнения работ, связей, ресурсов, календарей и стоимостей в соответствии с нижеприведенным списком:

- допускается задание работ различных видов, таких как простые активности, вехи начала и завершения работ, «короткие гамаки», «длинные гамаки», а также составные работы, обеспечивающие иерархическую многоуровневую структуризацию проектного плана;
- взаимосвязи работ могут устанавливать отношения предшествования не только между окончанием предшествующей работы и началом

последующей работы, но также и между любыми событиями, связанными с их началом и завершением;

- исполнение работ и привлечение ресурсов в рамках проектной деятельности обычно осуществляется на основе календарей, определяющих графики работы;
- для работ могут быть заданы явные временные ограничения, определяющие алгебраические условия их начала и завершения;
- ресурсная модель должна допускать использование невозобновимых, ограничено-возобновимых, частично возобновимых, логистических, непрерывно разделяемых, исключительных ресурсов, а также ресурсов с переменной доступностью;
- допускается выбор альтернативных целевых функций для минимизации временных показателей проекта, обеспечения консервативности и устойчивости расписания к задержкам, минимизации затрат на возобновимые ресурсы, минимизации потребления невозобновимых ресурсов, минимизации общей стоимости проекта, максимизации чистой приведенной стоимости, а также достижения многокритериальных показателей проекта;
- задача проектного планирования может решаться в инкрементальной постановке, когда требуется скорректировать расписание с учетом измененных условий исходной задачи или при актуализации данных непосредственно на проектной площадке в режиме реального времени.

Основываясь на перечисленных особенностях, предлагается способ математической формализации предложенного класса задач обобщенного проектного планирования. В отличие от RCPSP-задач не уточняется семантика неизвестных переменных, целевой функции и ограничений. Вместо этого класс задач GCPSP определяется самым общим образом с уточнением свойств целевой функции, вида алгебраических ограничений и способа их разрешения относительно тех или иных переменных. Существенно, что класс GCPSP охватывает перечисленные выше расширенные постановки классической RCPSP-задачи.

Определение 1. Четверку множеств $\langle D, X, C, P \rangle$ назовем задачей в ограничениях с приоритетами, где $D = \{D_1 \times D_2 \times \dots \times D_n\}$ — домен, определяющий область допустимых значений множества переменных задачи $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \in D$, $x_i \in D_i$, $i = 1, 2, \dots, n$; $C = \{c_1(X_1), c_2(X_2), \dots, c_m(X_m)\}$ — множество предикатов $c_j(X_j)$, $j = 1, 2, \dots, m$, определенных на подмножествах переменных $X_j = \{x_{i_1^{(j)}}, x_{i_2^{(j)}}, \dots, x_{i_{k_j}^{(j)}}\} \subseteq X$ и называемых ограничениями задачи; $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ — множество натуральных чисел $p_j \in N$, называемых приоритетами ограничений. Пусть $I(X_j) = \{i_1^{(j)}, i_2^{(j)}, \dots, i_{k_j}^{(j)}\} \subseteq \{1, 2, \dots, n\}$ — множество индексов подмножества

переменных X_j . Тогда будем говорить, что переменная задачи x_i , $1 \leq i \leq n$ участвует в ограничении $c_j(X_j)$, $1 \leq j \leq m$ или ограничение ассоциировано с переменной, если $i \in I(X_j)$. Ограничение $c_j(X_j)$ будем называть удовлетворённым при любом множестве значений переменных $X_j^* \subseteq X^* \in D$, при котором соответствующий предикат принимает значение «истина».

Определение 2. Пусть $\langle D, X, C, P \rangle$ — задача в ограничениях с приоритетами. Значения переменных $X^* \in D$, при которых все ограничения задачи удовлетворены, будем называть решением задачи. Пусть $C^*(X)$ — множество ограничений, которые удовлетворены при значениях переменных X . Тогда X^* является решением задачи, только если $C^*(X^*) = C$.

Определение 3. Пусть $\langle D, X, C, P \rangle$ — задача в ограничениях с приоритетами. Значения переменных $X^* \in D$ будем называть согласованным решением задачи в ограничениях с приоритетами, если, по крайней мере, хотя бы одно ограничение удовлетворено и не существует других значений переменных Y , повышающих максимальный приоритет разрешенных ограничений: $C^*(X^*) \neq \emptyset$ и для любого неразрешенного ограничения $c_j \in C \setminus C^*(X^*)$, $p_j \in P$ не существует значений $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\} \in D$, $Y \neq X^*$, таких что удовлетворяется каждое ограничение $c_k \in C^*(Y)$, $p_k \in P$ с приоритетом $p_k \geq p_j$.

Определение 4. Пусть $\langle D, X, C, P \rangle$ — задача в ограничениях с приоритетами. Значения переменных $X^* \in D$ будем называть локально согласованным решением задачи в ограничениях с приоритетами, если, по крайней мере, хотя бы одно ограничение удовлетворено и согласованы приоритеты разрешенных ограничений относительно каждой переменной: $C^*(X^*) \neq \emptyset$, а также для любой переменной $x_i \in X$ и для любого ассоциированного с ней неудовлетворенного ограничения $c_j(X_j) \in C \setminus C^*(X^*)$, $p_j \in P$, $i \in I(X_j)$ не существует значения переменной $y_i \in D_i$, $y_i \neq x_i$ такого, что удовлетворяется каждое ассоциированное с переменной ограничение $c_k \in C^*(Y)$, $p_k \in P$, $i \in I(X_k)$ с приоритетом $p_k \geq p_j$, где множество значений переменных $Y = \{x_1^*, x_2^*, \dots, y_i, \dots, x_n^*\}$.

Определение 5. Обобщенной задачей проектного планирования GCPSP будем называть задачу оптимизации целевой функции проекта на множестве локально согласованных расписаний. Для определенности ограничимся следующей математической постановкой

$$\min_{X \in D^*} f(X)$$

где $f(X): Z^n \rightarrow R$ — целевая функция, $D^* \subseteq Z^n$ — множество локально согласованных решений системы ограничений $c_j(X_j)$,

$$X_j = \left\{ x_{i_1(j)}, x_{i_2(j)}, \dots, x_{i_{k_j}(j)} \right\} \subseteq X \text{ с приоритетами } p_j \in N, j = 1, 2, \dots, m.$$

Предполагается, что ограничения разрешимы относительно переменных одним из нижеприведенных способов:

$$(1) \quad c_j(X_j) \Leftrightarrow x_{i_1}^{(j)} = g_j \left(x_{i_2}^{(j)}, x_{i_3}^{(j)}, \dots, x_{i_{k_j}}^{(j)} \right) \text{ (ограничения A)}$$

$$(2) \quad c_j(X_j) \Leftrightarrow x_{i_1}^{(j)} \in D_j^+ \left(x_{i_2}^{(j)}, x_{i_3}^{(j)}, \dots, x_{i_{k_j}}^{(j)} \right) \text{ (ограничения B)}$$

$$(3) \quad c_j(X_j) \Leftrightarrow x_{i_2}^{(j)} \in D_j^+ \left(x_{i_1}^{(j)} \right) \parallel x_{i_3}^{(j)} \in D_j^+ \left(x_{i_1}^{(j)} \right) \parallel \dots \parallel x_{i_{k_j}}^{(j)} \in D_j^+ \left(x_{i_1}^{(j)} \right) \text{ (ограничения C)}$$

$$(4) \quad c_j(X_j) \Leftrightarrow \text{для любого упорядочивания переменных ограничения } X_j, \text{ представимого биекцией множеств индексов } \pi^{(j)}: \{1, 2, \dots, k_j\} \rightarrow \{i_1^{(j)}, i_2^{(j)}, \dots, i_{k_j}^{(j)}\}, \text{ имеет место } x_{\pi_1^{(j)}} \in D_{\pi^{(j)},1}^+, x_{\pi_2^{(j)}} \in D_{\pi^{(j)},2}^+ \left(x_{\pi_1^{(j)}} \right), x_{\pi_3^{(j)}} \in D_{\pi^{(j)},3}^+ \left(x_{\pi_1^{(j)}}, x_{\pi_2^{(j)}} \right), \dots, x_{\pi_{k_j}^{(j)}} \in D_{\pi^{(j)},k_j}^+ \left(x_{\pi_1^{(j)}}, x_{\pi_2^{(j)}}, \dots, x_{\pi_{k_j-1}^{(j)}} \right) \text{ (ограничения D)}$$

$$(5) \quad c_j(X_j) \Leftrightarrow x_{i_1}^{(j)} \in D_j^- \left(x_{i_2}^{(j)}, \dots, x_{i_{k_j}}^{(j)} \right) \text{ (ограничения E)}$$

где $D_j^+ \in Z$, $D_{\pi^{(j)},k}^+ \in Z$ — подмножества целых чисел, содержащие открытые положительные интервалы, а $D_j^- \in Z$ — подмножества целых чисел, содержащие открытые отрицательные интервалы.

Естественным визуальным представлением задачи GCPSP является двудольный направленный граф $G(X, C, R)$, где X — множество вершин, ассоциированных с переменными задачи, C — множество вершин, ассоциированных с ограничениями задачи, и R — множество ребер графа, соединяющих вершины ограничений с соответствующими вершинами переменных следующим образом. Если переменная задачи x_i участвует в ограничении c_j в качестве независимой переменной, то ребро является входящим в вершину ограничения (в применяемой нотации $x_i \rightarrow c_j$). Если переменная задачи x_i является зависимой переменной ограничения c_j , то ребро входит в вершину переменной ($c_j \rightarrow x_i$). Если ограничение c_j предусматривает правила разрешения относительно каждой своей переменной x_i , то ребра между соответствующими вершинами будем представлять как двунаправленные и записывать $x_i \leftrightarrow c_j$. Говорят, что переменная x_{i_1} прямо предшествует переменной x_{i_2} или $x_{i_1} \rightarrow x_{i_2}$, если существует такое ограничение задачи c_j , что $x_{i_1} \rightarrow c_j \rightarrow x_{i_2}$.

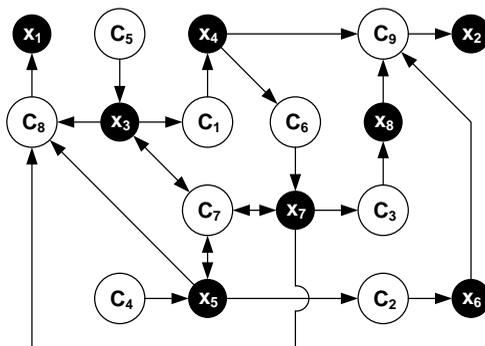


Рис. 1. Пример графа задачи GCPSP, отображающего взаимосвязи между переменными и ограничениями.

Теорема 1. Пусть $\langle D, X, C, P \rangle$ — обобщенная задача GCPSP. Решение задачи всегда существует, если

- (1) целевая функция задачи $f(X)$ является монотонно неубывающей по каждой переменной;
- (2) граф задачи $G\langle X, C, R \rangle$ ациклический;
- (3) ограничения (A) имеют наивысший приоритет, а приоритеты ограничений (B), (C) и (D) выше приоритета ограничений (E);
- (4) ни одна переменная задачи не ассоциирована с более чем одним ограничением (A) в качестве зависимой переменной;
- (5) каждая переменная задачи участвует, по крайней мере, в одном ограничении (A), (B), (C) или (D) в качестве зависимой переменной.

Теорема 2. Пусть $\langle D, X, C, P \rangle$ — обобщенная задача GCPSP. Решение задачи всегда существует, если

- (1) целевая функция задачи $f(X)$ по каждой переменной не убывает на некотором положительном полуинтервале и не возрастает на некотором отрицательном полуинтервале;
- (2) граф задачи $G\langle X, C, R \rangle$ ациклический;
- (3) для каждой переменной задачи и ограничений, в которых она участвует как зависимая переменная, наивысший приоритет имеют либо одно ограничение (A), либо несколько ограничений (B), (C) и (D), либо несколько ограничений (E).

Доказательства теорем представлены в настоящей главе работы. Далее описывается и приводится на псевдокоде алгоритм решения задачи GCPSP, реализующий вариант метода линейной диспетчеризации. Алгоритм реализуется в рамках обобщенной вычислительной схемы, применимой как для приближенных, так и точных алгоритмов поиска расписаний.

Теорема 3. Класс задач RCPSP принадлежит классу задач обобщенно проектного планирования GCPSP. В предположениях классической постановки RCPSP существуют решения эквивалентных задач GCPSP. Обобщенный алгоритм проектного планирования сводится к алгоритму последовательной диспетчеризации работ в случае задач RCPSP.

Доказательство теоремы приводится в диссертационной работе.

Глава 3 посвящена вопросам проектирования и разработки объектно-ориентированного каркаса и приложений на его основе. Глава состоит из четырёх подразделов: общие принципы организации объектно-ориентированного каркаса, разработка модели прикладных данных, организация классов математических объектов и решателей и описание метода разработки приложений на основе инструментальной среды.

Разработанный каркас представляет собой систему классов (в дальнейшем, учитывая практическую реализацию на языке Си++, будем использовать принятые термины «класс», «конкретный класс», «абстрактный класс» и «интерфейс»).

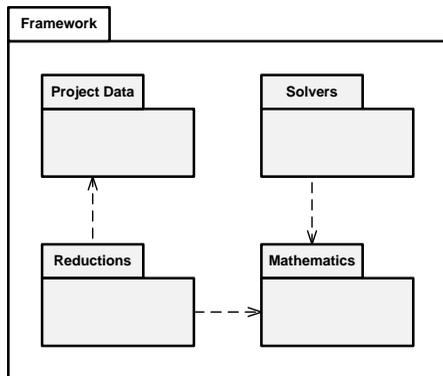


Рис. 2. Организация пакетов классов каркаса и основные отношения использования.

В организации каркаса выделим следующие пакеты классов:

- пакет классов решателей (Solvers), реализующих общие алгоритмические схемы решения задач GCPSP (Schedulers), а также эвристики для поиска приближенных решений (Heuristics);
- пакет классов математических объектов (Mathematics), предназначенных для задания условий и получения результатов решения задач в обобщенной постановке GCPSP;
- пакет классов математической редукции (Reductions), обеспечивающих сведение прикладных задач составления расписаний к постановке GCPSP и соответствующую интерпретацию прикладных данных;

— пакет классов прикладных данных (Project Data), используемых для представления условий и результатов решения задач проектного планирования RCPSP в расширенных постановках.

Пакет классов прикладных данных реализует основные понятия обсуждаемой предметной области. Класс Project агрегирует в себе проектные данные, необходимые для математически корректной постановки задачи проектного планирования, и предоставляет необходимые интерфейсы доступа к ним. Сам проект представляется иерархией связанных между собой работ с назначенными календарями, ресурсами и счетами. Перечисленные понятия реализуются соответствующими классами Project, Task, Link, Calendar, Resource, Account соответственно.

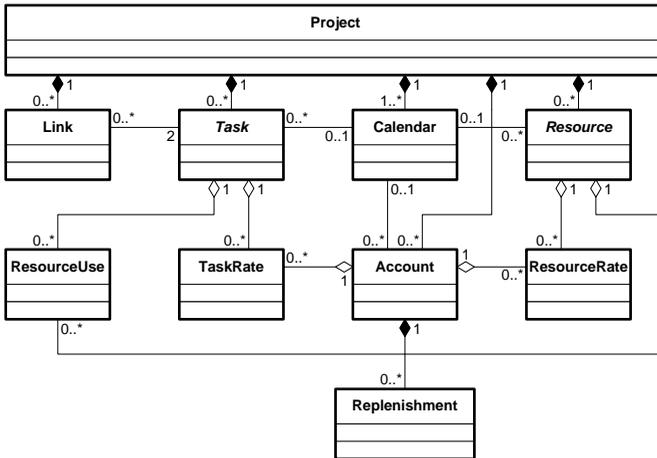


Рис. 3. UML-диаграмма основных классов прикладных данных.

Абстрактный класс Task определяет общие методы получения и задания параметров работы. Основными параметрами работ являются планируемые и фактические даты начала и завершения работы, ее продолжительность, рабочий календарь, наложенные ограничения, используемые ресурсы, стоимость, счёт, приоритет, режим исполнения, статус и процент выполнения. В зависимости от вида работы логика реализации методов претерпевает существенные изменения и поэтому вынесена на уровень конкретных классов.

Класс Link предназначен для задания условий предшествования и синхронизации между работами при постановке задач проектного планирования.

Для работы с календарями в состав объектно-ориентированного каркаса включен конкретный класс Calendar. Календари организуются в виде иерархической структуры с введенным отношением наследования между

родительскими и дочерними элементами. Наследуемый календарь может уточнять или переопределять фактическое рабочее расписание родительского календаря. Календари определяют графики исполнения работ и привлечения (доступности) ресурсов.

Каркас поддерживает несколько категорий ресурсов, реализуемых соответствующими классами простого ресурса SimpleResource, группового ресурса GroupResource, объединения ресурсов JointResource и семейства ресурсов FamilyResource. За исключением простого ресурса все остальные виды являются составными, что предполагает композицию дочерних или ассоциацию сторонних ресурсов. Абстрактный класс Resource определяет базовый тип, от которого наследуются все перечисленные выше конкретные классы.

Класс Account реализует понятие банковского счёта или кошелька. Любой счёт может использоваться как для списания финансовых средств, так и для их пополнения. Счета могут быть ассоциированы с работами, ресурсами, календарями или проектом в целом.

Перечисленные выше классы, их атрибуты и методы подробно рассмотрены в настоящей главе работы. Также описаны вспомогательные и специальные классы проектных данных: Time, Date, DateAndTime, TimeInterval, Duration, DayOfWeek, WorkWeek, MonthOfYear, RecurrencePattern, RecurrenceTimeInterval, Activity, Milestone, WBS, Hammock, MultimodalTask, SimpleResource, Supply, GroupResource, JoinResource, FamilyResource, ResourceUse, Cost, Currency, CostType, Replenishment, TaskRate, ResourceRate.

Пакеты классов математических объектов (Mathematics) и решателей (Solvers) в определённой степени изолированы от классов прикладных данных (Project Data), рассмотренных выше. Данные классы реализуют математические понятия и алгоритмы теории расписаний. Для сведения прикладных задач к обобщенной постановке проектного планирования, формулируемой в математически нейтральной форме, предусмотрены специальные классы редукции (Reductions), которые реализуют интерфейсы математических объектов с учетом особенностей прикладных задач и, тем самым, выполняют функции посредников между прикладными и математическими классами каркаса.

Класс OptimizationProblem предназначен для постановки задачи условной нелинейной оптимизации путем задания множества переменных, целевой функции и системы нелинейных алгебраических ограничений. Класс реализуется как композиция математических объектов, участвующих в постановке задачи. Такими объектами являются переменные задачи — экземпляры класса Variable, целевая функция — класса Objective и алгебраические ограничения — класса Constraint.

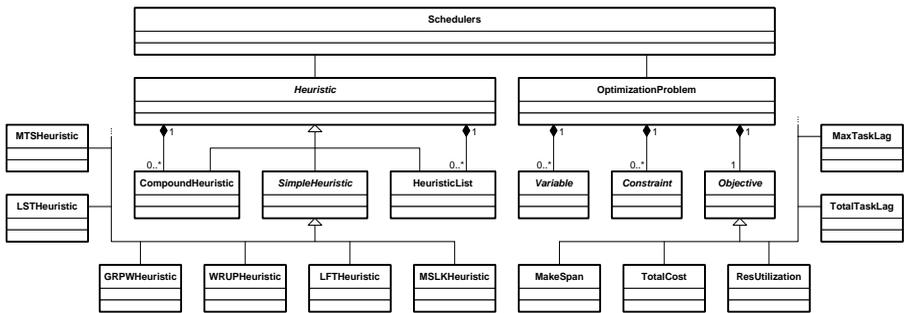


Рис. 4. UML-диаграмма классов математических объектов и решателей.

Конкретный класс Scheduler реализует алгоритмы точного и приближенного поиска решения оптимизационной задачи построения расписания, описанные в главе 2. Поиск приближённого решения предполагает задание эвристик в виде упорядоченного множества объектов типа Heuristic. В настоящей главе приводятся популярные эвристики, которые были реализованы в составе каркаса в виде конкретных классов, унаследованных от абстрактного класса Heuristic.

В диссертационной работе также приводятся листинги программного кода на языке Си++, демонстрирующие последовательность необходимых операций и вызовов функций для точного и приближенного решения задачи проектного планирования.

В общем случае метод построения целевого приложения с типовыми функциями проектного планирования сводится к выполнению следующих работ:

- использование пакета Project Data для представления, хранения проектных данных и для задания условий планирования;
- конфигурирование классов решателей для задания соответствующих целевых функций, ограничений и установки требуемых эвристик;
- разработка графического интерфейса пользователя целевого приложения для ввода, редактирования, визуализации проектных данных, в том числе с использованием текстовых отчетов, графиков, диаграмм.

В частных случаях могут потребоваться дополнительные усилия для развития имеющихся пакетов классов:

- расширение пакета классов Project Data для представления специальных условий планирования и их сведения к расширенной постановке RCPSP;
- расширение пакета классов Reductions для приведения специальных условий планирования к обобщенной математической постановке GCPSP;
- расширение пакета классов Solvers для реализации новых алгоритмов и эвристик с учетом особенностей прикладных задач.

Глава 4 посвящена экспериментальному исследованию инструментальной среды при создании, сопровождении и развитии целевой системы.

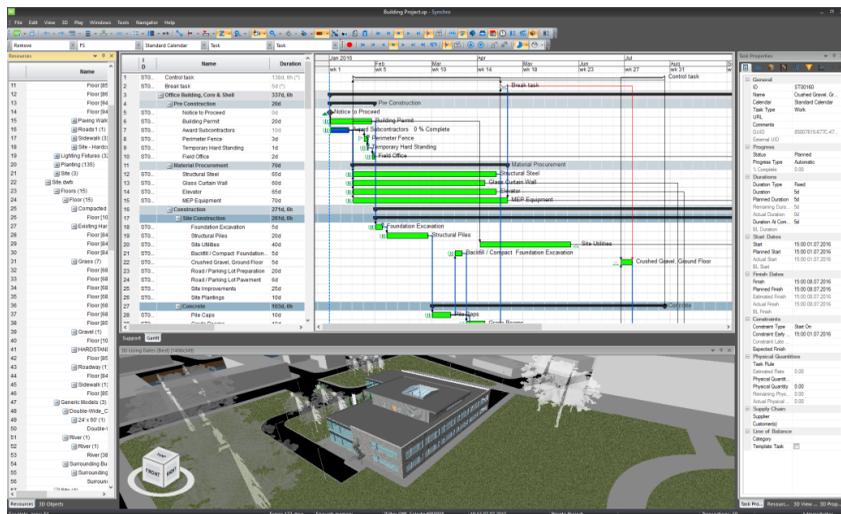


Рис. 5. Графический интерфейс пользователя целевой системы Synchro.

Разработанные инструментальная среда и связанный с ним метод разработки программных приложений были успешно применены для построения и функционального развития системы визуального моделирования и планирования проектов Synchro. Наличие готовых к использованию математических средств решения типовых задач проектного планирования позволило относительно быстро поддержать их в составе целевой системы. С развитием системы и появлением новых требований к функциям планирования потребовалось расширение модели прикладных данных и связанная с ним адаптация средств решения. С этой целью в пакете Reductions были реализованы дополнительные классы, которые позволили редуцировать прикладные условия к стандартной алгебраической форме задачи обобщенного проектного планирования GCPSP.

Трудозатраты (в строках программного кода) на реализацию данных классов приведены в таблице 1. Поддержка каждого из новых типов ограничений в основном сводилась к реализации нового класса в пакете Reductions, описываемого в среднем 530 строками программного кода, что составляет 0,39% от общего количества строк кода инструментальной среды.

В главе подробно обсуждаются особенности реализации целевой системы с использованием инструментальной среды и достигнутые при этом преимущества, в частности, возможности инкрементального развития средств проектного планирования.

Табл. 1. Оценка трудозатрат развития целевого приложения.

Тип ограничения	Кол-во строк кода	Доля от общего кол-ва строк
Отношения предшествования работ	211	0,16%
Календарные условия	374	0,28%
Явные временные ограничения	170	0,13%
Обязательные временные ограничения	153	0,11%
Правила выравнивания дат	97	0,07%
Ресурсные ограничения	669	0,49%
Ограничения рабочих пространств	2033	1,5%

Общность программной реализации алгоритмов и использование многопараметрических моделей могут существенно влиять на производительность целевой системы. Поэтому важным было убедиться, что возможный негативный эффект не столь существенен и разработанное целевое приложение может конкурировать с популярными системами управления проектами при решении промышленных задач высокой размерности.

Оценка производительности систем проводилась по критерию затраченного процессорного времени на составление расписания в зависимости от размерности задачи (числа переменных и ограничений). В качестве тестов использовались как синтезированные наборы проектных данных, так и планы реальных промышленных проектов.

Одна из серий экспериментов предназначалась для анализа производительности систем в зависимости от размерности задач планирования в постановке расчета критического пути (СРМ). Поскольку синтезированные проектные планы имели фиксированные соотношения глубины и кратности связей в каждом тестовом наборе, размерность задач в тестах различалась лишь числом работ. Для каждого теста в наборе составлялось расписание средствами пяти различных коммерческих систем планирования и замерялось среднее затраченное процессорное время. На рисунке 6 приведены типовые графики зависимости процессорного времени от количества работ в проектном плане. С ростом размерности задачи планирования целевая система демонстрировала наилучшие результаты.

В другой серии экспериментов расписание строилось с учетом ресурсных ограничений. В испытаниях участвовали только системы, предоставляющие подобную функциональность. На рисунке 7 представлены характерные показатели производительности популярных систем проектного планирования. Отставание в производительности целевой системы объясняется не особенностями ее программной реализации, а приближенным алгоритмом, обеспечивающим более качественное решение по сравнению с наивным алгоритмом балансировки ресурсов, применяемом в другой системе.

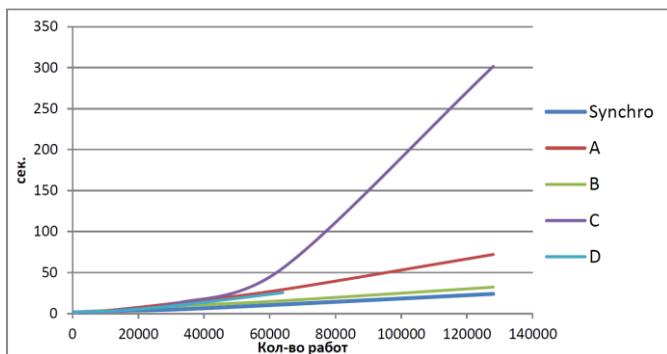


Рис. 6. Зависимость процессорного времени составления расписания в постановке СРМ от размерности задачи.

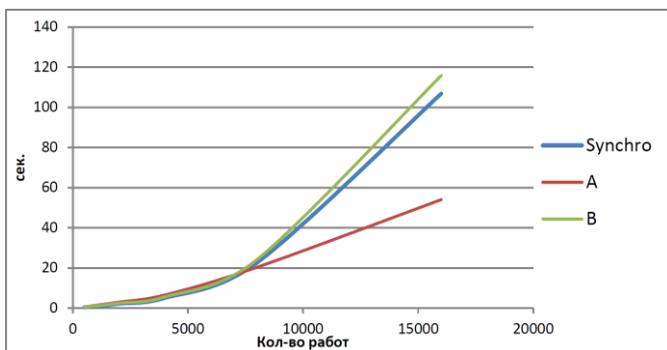


Рис. 7. Зависимость времени поиска расписания от размерности плана (с учётом ресурсов).

Предоставляя более широкие функциональные возможности и лучшее качество решений, разработанная целевая система не уступает по производительности популярным системам управления проектами при решении задач проектного планирования в аналогичных постановках.

В **заключении** перечисляются основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

— Предложен и математически формализован класс задач обобщённого проектного планирования (Generally Constrained Project Scheduling Problem — GCPSP), охватывающий задачи теории расписаний и проектного планирования в расширенных постановках. GCPSP задача ставится как

оптимизационная задача на множестве решений, локально согласованных с эквивалентной системой ограничений с приоритетами.

- Доказаны конструктивные утверждения о существовании решения задач в классе GCSPS, о сводимости классических постановок теории расписаний к задачам данного класса, а также о возможности их точного и приближённого решения на основе предложенного обобщённого алгоритма.
- На языке Си++ разработана и реализована объектно-ориентированная среда, предусматривающая инструментальные возможности для программной реализации моделей, методов и приложений теории расписаний, а также предоставляющая средства решения промышленных задач высокой размерности.
- Разработан метод построения и инкрементального развития приложений теории расписаний на основе объектно-ориентированной среды.
- Метод и среда успешно прошли экспериментальное исследование в ходе создания, сопровождения и развития коммерческой системы визуального моделирования и планирования проектов, используемой в 36 странах мира.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Semenov V.A., Anichkin A.S., Morozov S.V., Tarlapan O.A., Zolotov V.A. Visual Planning and Scheduling of Industrial Projects with Spatial Factors. // Proceedings of the 20th ISPE International Conference on Concurrent Engineering (под ред. Bil C., Mo J., Stjepandić J.), Мельбурн, Австралия, 2013, стр. 343–352.
2. Семенов В.А., Аничкин А.С., Морозов С.В., Тарлапан О.А., Золотов В.А. Комплексный метод составления расписаний для сложных промышленных программ с учетом пространственно-временных ограничений. // Труды ИСП РАН (под ред. В. П. Иванникова), том 26, вып. 1, 2014 г., стр. 457–482, DOI: 10.15514/ISPRAS-2014-26(1)-20.
3. Аничкин А.С., Семенов В.А. Современные модели и методы теории расписаний. // Труды ИСП РАН (под ред. В. П. Иванникова), том 26, вып. 3, 2014 г., стр. 5–50, DOI: 10.15514/ISPRAS-2014-26(3)-1.
4. Аничкин А.С., Семенов В.А. Математическая формализация задач проектного планирования в расширенной постановке. // Труды ИСП РАН, том 29, вып. 2, 2017 г., стр. 231–256, DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(2)-9.
5. Аничкин А.С., Семенов В.А. Объектно-ориентированный каркас для программной реализации приложений теории расписаний. // Труды ИСП РАН, том 29, вып. 3, 2017 г., стр. 247–296, DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(3)-14.

6. Аничкин А.С., Морозов С.В., Семенов В.А., Тарлапан О.А. Эволюционная разработка системы визуального планирования проектов на основе объектно-ориентированного каркаса. // Труды ИСП РАН, том 29, вып. 5, 2017 г., стр. 239–256, DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(5)-12.
7. Аничкин А.С., Семенов В.А. Объектно-ориентированный каркас для разработки приложений теории расписания. // Информационные технологии в науке, образовании и управлении: труды международной конференции IT + S&E'15 (под ред. Глориозова Е.Л.), весенняя сессия, 22 мая – 01 июня 2015 г., Ялта-Гурзуф, Крым, Россия, стр. 460–464.
8. Аничкин А.С., Семенов В.А. Об обобщённой математической постановке задач проектного планирования. // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении (под ред. Глориозова Е.Л.), вып. 2, 2017 г., стр. 74–86.
9. Аничкин А.С., Казаков К.А., Семенов В.А. Календарно-сетевое планирование промышленных проектов с учётом перегруженности рабочих зон. // Информационные и математические технологии в науке и управлении: Труды XX Байкальской Всероссийской конференции (30 июня – 07 июля 2015 г.), в 3 томах (под ред. Массель Л.В.), Иркутск, Байкал, Россия, 2015, том 1, стр. 7–14.
10. Semenov V., Anichkin A., Morozov S., Tarlapan O., Zolotov V. Effective project scheduling under workspace congestion and workflow disturbance factors. // Australasian Journal of Construction Economics and Building Conference Series, том 2, вып. 1, 2014 г., стр. 35–50, ISSN: 2200-7679.
11. Semenov V., Anichkin A., Morozov S., Tarlapan O., Zolotov V. Effective project scheduling under workspace congestion and workflow disturbance factors. // Proceedings of the 13th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality (под ред. Dawood N., Kassem M.), 30 – 31 октября 2013 г., Лондон, Великобритания, стр. 239–252.
12. Семенов В.А., Аничкин А.С., Казаков К.А., Тарлапан О.А. Пространственно-временное моделирование и планирование промышленных проектов. // Труды научной конференции, посвященной 80-летию со дня рождения академика В.А. Мельникова, 19 – 20 февраля 2009 г., Москва, Россия, стр. 111–113.
13. Семенов В.А., Аничкин А.С., Казаков К.А. О некоторых актуальных задачах визуального моделирования проектных планов. // Материалы XXXVI международной конференции «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе» IT + SE'09, весенняя сессия, 20 – 30 мая 2009 г., Ялта–Гурзуф, Крым, Украина, стр. 64–65.