

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В ГЕТЕРОГЕННОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ<sup>1</sup>

А.Г. Феоктистов, Ю.А. Дядькин, Е.С. Фереферов, О.Ю. Башарина (Иркутск)

Логистические складские комплексы (ЛСК) относятся к важному классу систем массового обслуживания (СМО). Актуальными проблемами управления складом являются анализ и оптимизация параметров их организационно-функциональной структуры на основе заданных критериев ее эффективности. В силу большого числа объектов ЛСК, их взаимосвязей различной природы, а также стохастичности событий, возникающих в процессе его работы, построение аналитической модели такого комплекса может оказаться достаточно сложным. В этом случае целесообразным подходом к решению вышеупомянутых проблем может быть применение имитационного моделирования [1], в рамках которого процесс анализа и оптимизации работы ЛСК включает создание его имитационной модели и ее исследование на основе многовариантных расчетов. Исследователь оптимизирует значения наблюдаемых переменных (критериев эффективности функционирования ЛСК) путем перебора допустимых значений входных переменных в заданных диапазонах. Как правило, возникает большое число вариантов (сочетаний) значений входных переменных, что актуализирует использование высокопроизводительных систем. Часто возникает необходимость проведения расчетов в среде виртуализированных вычислительных ресурсов, организация которой требует привлечения специальных инструментальных средств.

В докладе представлены новые инструментальные средства для имитационного моделирования ЛСК в гетерогенной распределенной вычислительной среде, организованной на базе ресурсов центра коллективного пользования (ЦКП) «Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН» (ИСКЦ) [2], в процессе поддержки принятия решений по оптимизации работы комплекса. В качестве базовой среды моделирования использована система General Purpose Simulation System (GPSS) [3]. Для виртуализации ресурсов, функционирующих под управлением операционной системы Linux, были применены специализированные средства [4], обеспечивающие выполнение вычислений в среде виртуальных машин. Управление вычислениями осуществляется средствами инструментального комплекса DISCOMP [5].

### Моделирование логистического складского комплекса

ЛСК выполняет следующие основные логистические операции: транспортировку, погрузку, разгрузку, упаковку, складирование и обработку грузов, сбор возвратных отходов, распределение грузов, ценообразование а также ряд дополнительных операций (рис. 1,а), применяемых к информационным потокам. Они включают в себя операции планирования, прогнозирования отказов оборудования, преобразования внешних ограничений во внутренние, распределения ресурсов, анализа эффективности операций и другой информационной деятельности. Материальные и информационные потоки определяют отношения между операциями. Менеджер ЛСК (лицо, принимающее решение) использует информационно-управляющую систему складом для организации и оптимизации материальных, финансовых и информационных потоков путем определения структурных и параметрических характеристик процессов функционирования комплекса и управления им.

На рис. 1,б показана схема управления ЛСК. С помощью сервис-ориентированного доступа менеджер использует систему имитационного моделирования для прогнозирования возможного развития событий в работе комплекса и формирования управляющих воздействий

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты № 16-07-00931 и № 17-47-380003, а также Программы 1.33П фундаментальных исследований Президиума РАН, проект «Разработка новых подходов к созданию и изучению сложных моделей информационно-вычислительных и динамических систем с приложениями».

на логистические процессы через информационно-управляющую систему. Планирование и проведение имитационного моделирования реализовано в сервисе имитационного моделирования [6], организованного на базе ресурсов ЦКП ИСКЦ.

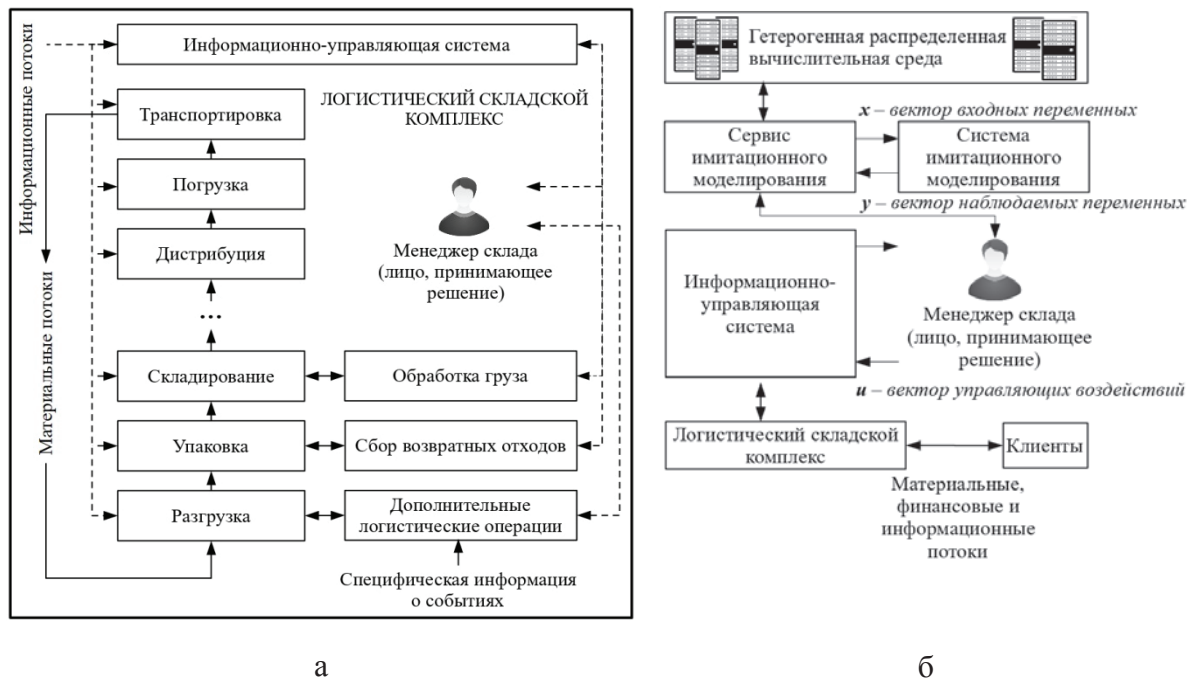


Рис. 1. Схемы выполнения логистических операций (а) и управления складом (б)

В рамках системы имитационного моделирования решается следующая задача исследования ЛСК:

$$y_i(\mathbf{x}) \rightarrow \min(\max), \quad (1)$$

$$y_i^{\min} \leq y_i \leq y_i^{\max}, \quad x_j \in D_j, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где  $D_j$  – это область допустимых значений элемента  $x_j$  вектора  $\mathbf{x}$ . Для разных элементов  $y_i$  вектора  $\mathbf{y}$  их зависимость от  $\mathbf{x}$  в (1) представима функциональными, статистическими, неоднозначными или другими отношениями. Тип экстремума для  $y_i$  задается менеджером.

Задача, описанная в (1)–(2), решается путем варьирования значений для элементов вектора  $\mathbf{x}$ , проведением многовариантных расчетов в гетерогенной распределенной вычислительной среде и последующим многокритериальным выбором  $y_i$ . Значения элементов вектора  $\mathbf{x}$ , соответствующие  $y_i$ , отождествляются со значениями элементов вектора  $\mathbf{u}$ . Менеджер регулирует параметры логистических процессов, используя управляющие воздействия, представленные вектором  $\mathbf{u}$ . Регулируются следующие параметры: стандарты, затраты и стоимость для логистических операций, их обеспечение людскими и техническими ресурсами, категории клиентов, уровни их обслуживания и другие характеристики.

Для построения имитационных моделей СМО в Институте динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН разрабатывается инструментальный комплекс SIRIUS II [7]. Создаваемая в нем модель ЛСК включает в себя одноканальные и многоканальные услуги. Очередь запросов клиентов обрабатывается в соответствии с дисциплиной FCFS (First Come, First Served) с резервированием ресурсов. Резервирование

включено в график обслуживания. В модели может быть реализовано как однофазное, так и многофазное обслуживание клиентов. Имитационная модель разрабатывается в качестве приложения, поддерживающего многовариантные расчеты.

### Вычислительные эксперименты

Предлагаемый подход применен в процессе параметрической и структурной оптимизации процесса функционирования ЛСК ООО «Иркутский хладокомбинат». В рамках проведенных исследований решались следующие задачи оптимизации:

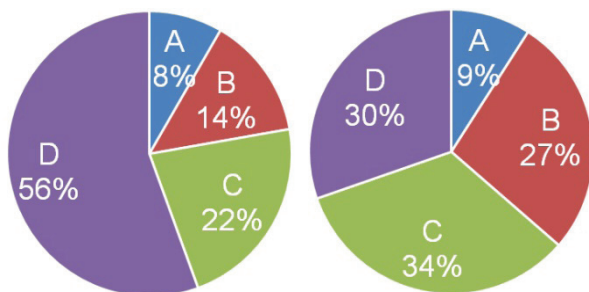
1) совершенствование процессов погрузки и разгрузки, включая обратную переработку отходов;

2) реструктуризация обслуживания клиентов, включая категоризацию клиентов на основе их качественных и количественных характеристик, определение уровней обслуживания для различных категорий клиентов и выбор стандартов работ;

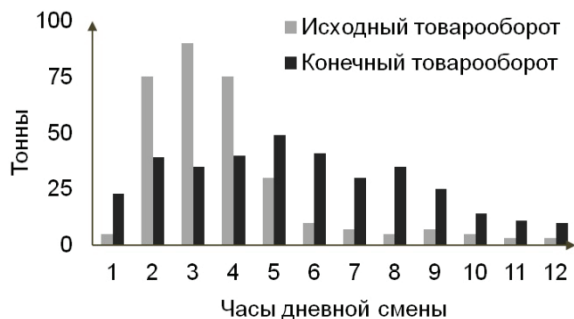
3) переоборудование дополнительных объектов коммерческой недвижимости.

Особенностями этих задач является учет отказов оборудования и рисков, связанных с человеческими факторами. Клиенты разбиты по убыванию на четыре категории А–D в соответствии с их объемом товарооборота.

В инструментальном комплексе SIRIUS II описана концептуальная модель ЛСК, на ее основе разработаны имитационные модели на языке GPSS для решения вышеперечисленных задач, создано приложение, поддерживающее многовариантные расчеты и включающее разработанные модели, средства планирования экспериментов и выполнения моделей. Планирование экспериментов проводилось с помощью методов, предложенных в [3]. В результате решения задач 1–3 улучшена долевая структура клиентов ЛСК – численный состав категорий А–D (рис. 2,а), увеличен и сбалансирован его суточный товарооборот (рис. 2,б) и увеличен доход от сдачи в аренду дополнительных объектов коммерческой недвижимости по сравнению с предыдущим годом (рис. 2,в). В том числе улучшены следующие критерии (рис. 2,г):  $c_1$  – эффективность работы грузчиков (9%);  $c_2$  – среднее время выполнения погрузочно-разгрузочных операций (6%);  $c_3$  – средняя прибыль от погрузочно-разгрузочных операций (11%);  $c_4$  – среднее время обработки возвратных отходов (10 %);  $c_5$  – прибыль от реализации возвратных отходов (75 %);  $c_6$  – число кладовщиков (20 %);  $c_7$  – число вызовов лифтов (12 %);  $c_8$  – наполнение склада (8 %);  $c_9$  – прибыль от сдачи в аренду дополнительных объектов коммерческой недвижимости (23 %).



а



б

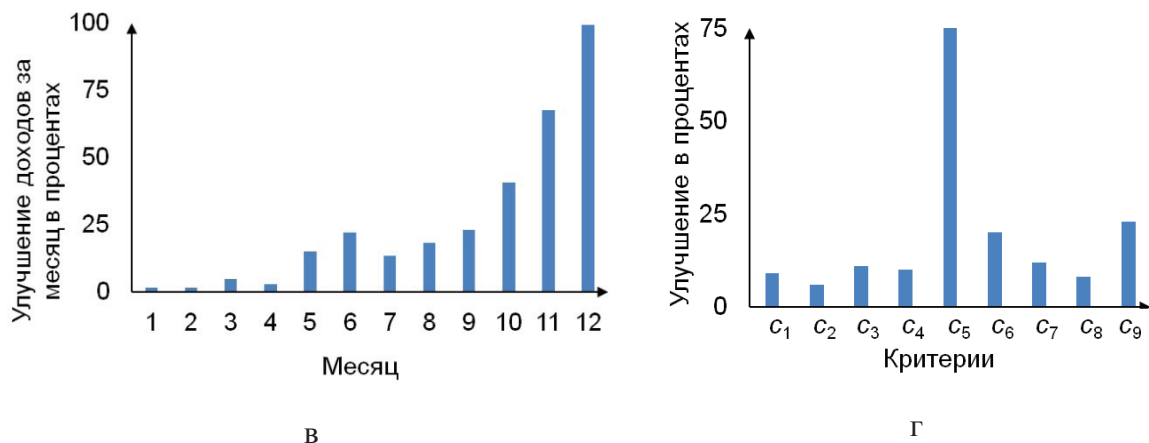


Рис. 2. Результаты решения задач: улучшение структуры клиентов (а), увеличение и балансировка суточного товарооборота (б), увеличение дохода от сдачи в аренду дополнительных объектов коммерческой недвижимости (в), улучшение критериев эффективности функционирования склада (г)

### Анализ эффективности вычислений

Все эксперименты выполнены в ЦКП ИСКЦ [2].

В процессе решения задач использовались вычислительные узлы со следующими характеристиками: T-Blade V205S (2x16 cores CPU AMD Opteron 6276, 2.3 GHz, 16 MB L3 cache, 4 FLOP/cycle, 64 GB RAM DDR3-1600). Время решения задач 1–3 составило соответственно 8,3; 2,5 и 20,7 ч.

Рис. 3,а и 3,б демонстрируют ускорение и эффективность вычислений в процессе решения задач по сравнению с количеством ядер в гетерогенной распределенной вычислительной среде с виртуализированными ресурсами. Эти результаты подтверждают масштабируемость приложения, разработанного с помощью инструментального комплекса SIRIUS II.

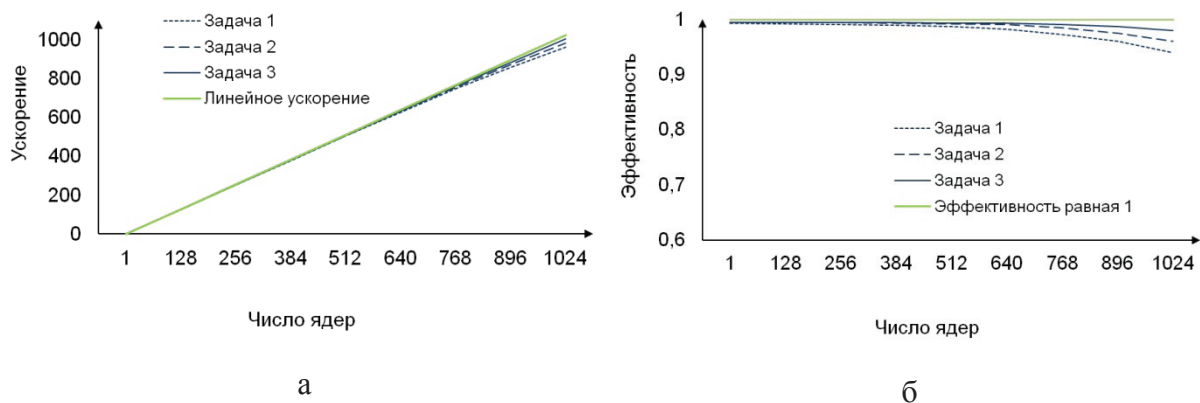


Рис. 3. Ускорение (а) и эффективность (б) вычислений

Высокая масштабируемость обуславливается хорошей загрузкой процессоров используемых узлов в процессе выполнения независимых заданий, реализующих многовариантные расчеты, а также их эффективным распределением в виртуализированной среде с помощью инструментального комплекса DISCOMP.

### Заключение

Результаты исследования показали, что разработанные методы и средства имитационного моделирования СМО обеспечили существенную поддержку в процессе принятия решений об оптимизации организационно-функциональной структуры ЛСК. Исходя из анализа результатов экспериментов, можно также сделать вывод о высокой масштабируемости приложений, разработанных с помощью инструментального комплекса SIRIUS II и поддерживающих многовариантные расчеты в гетерогенной распределенной вычислительной среде с виртуализированными ресурсами.

Предложенный подход к моделированию СМО может быть применен к широкому спектру прикладных задач. В частности, авторами доклада решаются на его основе такие задачи, как исследование надежности функционирования вычислительных и телекоммуникационных систем [8], моделирования производственной линии [9], а также оптимизация процессов оказания медицинских услуг населению [10].

### Литература

1. **Таха Н.А.** Operations research: an introduction – Cambridge: Pearson, 2016. – 848 p.
2. ЦКП Иркутский суперкомпьютерный СО РАН [Электронные ресурсы]. <http://hpc.icc.ru> (дата обращения: 25.09.2017).
3. **Боев В.Д.** Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World. СПб.: БХВ – Петербург, 2004. 368 с.
4. **Feoktistov A., Sidorov I., Sergeev V., Kostromin R., Bogdanova V.** Virtualization of Heterogeneous HPC-clusters Based on OpenStack Platform // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Вычислительная математика и информатика. 2017. Т. 6. № 2. С. 37–48.
5. **Сидоров И.А., Опарин Г.А., Феоктистов А.Г.** Разработка и применение распределенных пакетов прикладных программ // Программные продукты и системы. 2010. № 2. С. 108–111.
6. **Богданова В.Г., Пашинин А.А.** Инструментальные средства автоматизации многовариантных расчетов при исследовании систем массового обслуживания // Фундаментальные исследования. 2016. № 9-3. С. 467–472.
7. **Дядькин Ю.А., Фереферов Е.С.** Инструментальный комплекс имитационного моделирования разнородной распределенной вычислительной среды // Вычислительные технологии. 2016. Т. 21. № 3. С. 18–32.
8. **Бычков И.В., Опарин Г.А., Феоктистов А.Г., Корсуков А.С.** Испытание и оценка надежности интегрированных кластерных систем на основе их комплексного моделирования // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. № 3. С. 3–8.
9. **Феоктистов А.Г., Башарина О.Ю.** Автоматизация имитационного моделирования сложных систем в распределенной вычислительной среде // Программные продукты и системы. 2015. № 3. С. 75–79.
10. **Феоктистов А.Г., Дядькин Ю.А., Башарина О.Ю.** Модель исследования процесса функционирования лечебно-профилактического учреждения // Техника и технологии: новые перспективы развития // Сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. Уфа: АЭТЕРНА, 2017.