

УДК 519.8

## Исследование операций

### **Гущинский Николай Николаевич**

*ведущий научный сотрудник лаборатории математической кибернетики,  
кандидат физико-математических наук  
E-mail: gyshin@newman.bas-net.by*

### **Ковалев Михаил Яковлевич**

*главный научный сотрудник лаборатории математической кибернетики,  
доктор физико-математических наук  
E-mail: kovalyov\_my@newman.bas-net.by*

### **Розин Борис Матвеевич**

*ведущий научный сотрудник лаборатории математической кибернетики,  
кандидат технических наук  
E-mail: rozin@newman.bas-net.by*

### **Сотсков Юрий Назарович**

*главный научный сотрудник лаборатории математической кибернетики,  
доктор физико-математических наук  
E-mail: sotskov48@mail.ru*

### **Шафранский Яков Михайлович**

*ведущий научный сотрудник лаборатории математической кибернетики,  
кандидат физико-математических наук, доцент  
E-mail: shafr-04@yandex.by*

Создание научной школы исследования операций в Беларуси связано с заслуженным деятелем науки Республики Беларусь, лауреатом Государственной премии Республики Беларусь, академиком В. С. Танаевым. С 1970-х гг. представителями этой школы из ОИПИ НАН Беларуси и под их руководством защищено 6 докторских и 32 кандидатские диссертации, опубликовано 16 монографий, свыше 1400 научных статей, более 60 брошюр и сборников научных статей. Выполнено 18 международных научных проектов с участием партнеров из Австрии, Великобритании, Германии, Китая, Нидерландов, Норвегии, Польши, России и Франции.

В последние 10 лет участники школы получили наиболее значимые научные результаты по следующим направлениям исследования операций и его приложений: планирование и построение расписаний, проектирование производственных линий, оптимизация инфраструктуры и функционирования электротранспорта, логистика и цены в Интернете.

**Планирование и построение расписаний.** Минск является одним из мировых центров развития теории расписаний, основы которой были заложены во второй половине прошлого века, в том числе академиком В. С. Танаевым и его учениками [1]. Основными терминами этой теории являются приборы (станки, производственные линии, процессоры, команды исполнителей) и обрабатываемые (обслуживаемые) ими требования (производственные операции, работы, вычислительные задания, проекты). В последние годы в рамках теории расписаний интенсивно развиваются такие направления, как обслуживание требований партиями, построение расписаний с директивными сроками и окнами, модели на основе смешанных графов, построение расписаний в условиях неопределенности, сложность задач построения расписаний и др. Ниже приведен краткий обзор результатов по этим направлениям.

*Обслуживание требований партиями.* В последнее десятилетие получила дальнейшее развитие теория построения расписаний обслуживания требований партиями. В частности, подготовлена обширная библиография по недетерминированным задачам разбиения работ на партии [2], разработаны алгоритмы временной сложности  $O(n \log n)$  для двух классических задач обслуживания требований партиями [3, 4], построены полиномиальные и псевдополиномиальные алгоритмы, доказательства NP-трудности задач в случае наличия двух заинтересованных в обслуживании требований агентов [5, 6], а также приближенные алгоритмы для задачи с параллельными приборами [7].

*Построение расписаний с директивными сроками и окнами.* Критерии, включающие директивные сроки или окна, являются одними из основных в теории расписаний, поскольку они связаны с качеством обслуживания заказчиков продукции или услуг. Директивные сроки или окна могут быть фиксированными либо гибкими (назначаемыми). В последнем случае назначение директивных сроков или окон связано с оплатой их параметров: более удобные для исполнителя параметры стоят дороже. Для задачи с гибкими директивными окнами и системы параллельных приборов разработана вполне полиномиальная приближенная схема [8]. В случае одного прибора, назначаемых директивных сроков и максиминного критерия проведена полная классификация вычислительной сложности [9]. Для задач с фиксированными директивными сроками или окнами получены следующие результаты: разработаны алгоритмы и доказана NP-трудность различных случаев задачи с параллельными приборами и длительностями обслуживания, совпадающими с размерами окон [10]; полиномиальные точные и приближенные алгоритмы для задачи с параллельными приборами, единичными длительностями обслуживания и запретами промежуточных простоев приборов [11]; вполне полиномиальная приближенная схема и псевдополиномиальный алгоритм для построения расписания работы параллельных приборов с критерием максимизации суммарной работы, проведенной до общего директивного срока [12]; приближенный алгоритм и доказательство NP-трудности в сильном смысле для задачи минимизации общей стоимости одинаковых переналадок в расписании для одного прибора при наличии директивных сроков [13].

*Задачи в условиях неопределенности.* Неопределенность в задачах исследования операций, в том числе задачах планирования и построения расписаний, может быть обусловлена неточностью измерения входных данных, необходимостью принятия решения в неполностью определенном будущем, противоречивостью предпочтений при получении решения. Разработаны подходы к решению таких задач, основанные на использовании игровых алгоритмических механизмов [14–16]. Статья [16] удостоена приза "European Journal of Operational Research (EJOR) Editors' Choice Articles 2021". Учету и минимизации неопределенного риска при принятии решений посвящены работы [17, 18]. Быстродействующие полиномиальные алгоритмы разработаны для вариантов задачи о рюкзаке с неопределенным параметром в ограничении [19] и для неопределенной задачи выбора представителей из заданного множества [20]. Установлена вычислительная сложность и разработаны точные и приближенные алгоритмы решения двухкритериальной задачи составления расписаний занятий [21]. Предложены подходы, основанные на определении радиуса устойчивости, области устойчивости и других мер неопределенности отдельных точных и приближенных решений и их наборов по отношению к изменению числовых входных данных [22–25]. Исследованию сложности задач и построению расписаний в условиях интервальной неопределенности отдельных параметров требований посвящены работы [26–39]. Подход к оценке качества решений детерминированных задач оптимизации с неполным входом предложен в статье [40].

*Диспетчеризация многопроцессорных вычислительных заданий.* Суперкомпьютеры позволяют сократить время решения задач за счет распараллеливания процесса вычислений. При этом возникает задача оптимального распределения вычислительных задач по процессорам во времени. Эффективные алгоритмы решения данной задачи предложены в [41].

*Практические обобщения задач теории расписаний.* Планирование работы реального производства является источником новых элементов задач построения оптимальных расписаний. Задачи с условиями, характерными для сборочного производства, исследованы в [42]; задачи

с дополнительными ресурсами, отличными от приборов, а также с эффектами зависимости длительности обслуживания от места в расписании – в [43]; двухстадийные задачи с отсутствием ожидания между стадиями – в [44]; задачи минимизации стоимости выполнения работ параллельными приборами – в [45]; задачи выполнения параллельных работ с использованием невозобновляемых ресурсов – в [46]; задачи с переналадками, связанными с прерыванием обслуживания, – в [47]; задачи, связанные с обеспечением безопасности движения воздушных судов, – в [48, 49]. При построении практических расписаний в качестве подзадачи нередко приходится сталкиваться с задачей коммивояжера [50, 51], а имея дело с цепями производства и поставок, возникает необходимость прогнозирования параметров заявок потребителей [52]. Разработано и используется заказчиком алгоритмическое и программное обеспечение для построения месячного расписания работы отделочной фабрики (текстильное производство) [53, 54]; работа выполнена по заказу ОАО «Моготекс» (Могилев).

*Построение расписаний при наличии сервера.* В задачах такого рода помимо обычных приборов, обслуживающих требования, имеется сервер, выполняющий либо переналадку приборов, либо загрузку требований на приборы. Поскольку есть несколько приборов, а сервер – один, он зачастую является узким местом, создающим дополнительные трудности при построении расписания работы обслуживающей системы [55–63].

*Задачи построения расписаний на смешанных графах.* Исходные данные многих задач теории расписаний могут быть представлены смешанными графами с весами, приписанными их вершинам или дугам, или без весов. Такие задачи принято называть задачами построения расписаний на смешанных графах.

Разработаны модели и алгоритмы построения оптимальных и эвристических расписаний для многостадийных систем обслуживания с фиксированными маршрутами и параллельными приборами на стадиях [64–69].

*Задачи теории расписаний как раскраски вершин смешанных графов.* Ряд задач построения расписаний для многостадийных систем может быть сведен к задаче раскраски того или иного смешанного графа, а во многих случаях такие задачи оказываются эквивалентными друг другу [70–74].

*Альтернативный подход для доказательства NP-трудности задач оптимизации* разработан и используется при анализе алгоритмической сложности задач с трудновычислимыми целевыми функциями, задач теории расписаний в том числе [33, 75].

**Проектирование производственных линий.** Проектирование производственной (сборочной, обрабатывающей) линии является одним из наиболее важных этапов ее жизненного цикла из-за высокой стоимости используемого оборудования.

*Балансировка производственных линий.* Задача балансировки производственной линии заключается в том, чтобы как можно более равномерно распределить оборудование и другие ресурсы между рабочими станциями, что минимизирует длительность такта выпускаемой продукции (максимизирует интенсивность производства). Предложены и всесторонне исследованы комбинаторные модели выбора между универсальной линией либо несколькими специализированными линиями [76]. Мотивированные реальным производством автомобильных двигателей поставлены и решены задачи балансировки сборочной линии с целью минимизации количества рабочих [77] и стоимости переналадок [78].

Проведен анализ имеющихся стратегий распределения рабочей силы на реконфигурируемых производственных линиях [79, 80]. Исследованы задачи проектирования, балансировки и планирования сборочных линий с недетерминированными (стохастическими, нечеткими или неопределенными) параметрами [81].

*Оптимизация реконфигурируемых производственных систем и процессов производства.* Разработаны комплексные математические модели, методы и программные средства для задач выбора оборудования, балансировки и планирования процесса обработки на реконфигурируемых агрегатных станках со стационарным приспособлением, приспособлением на передвижном или поворотном столе [82–85] и поточных линиях из таких станков [86–91]. Рассмотрены три схемы выполнения групповой обработки заданной номенклатуры деталей: параллельная групповая обработка всей номенклатуры деталей [84, 85]; последовательная обработка деталей

партиями из деталей одного наименования с реконфигурацией и переналадкой оборудования, необходимого для обработки партии деталей следующего наименования [82, 85, 88, 90, 91]; последовательно-параллельная групповая обработка, когда вся номенклатура обрабатываемых деталей разбивается на подгруппы (партии), обрабатываемые по последовательной схеме, а все детали одной подгруппы обрабатываются по параллельной схеме [83, 85]. В качестве целевой функции использовались затраты на выпуск требуемого объема продукции, включая капитальные и эксплуатационные затраты на проектируемую производственную систему. Разработаны специальные методы поиска оптимальных решений, основанные на комбинации декомпозиционных приемов с методами динамического, нелинейного и смешанного линейного программирования, методами решения экстремальных задач на графах, а также метаэвристическими методами.

Предложены методы минимизации массы (габарита) агрегатного станка с многопозиционным поворотным столом, предназначенного для массового выпуска одной либо группы деталей за счет их оптимального размещения в секторе рабочей позиции стола [92, 93]. В качестве метода поиска решения использовался метаэвристический алгоритм «рой частиц».

*Планирование процесса производства на многопозиционных линиях.* При автоматизированном планировании процессов производства продукции, проектировании и управлении многопозиционными производственными системами часто возникают задачи, связанные с выбором режимов выполнения последовательности множеств взаимосвязанных операций. Разработаны и исследованы модели математического программирования задачи выбора режимов циклического выполнения множеств взаимосвязанных операций последовательно-параллельной структуры на многопозиционной линии. Задачи сведены к выбору интенсивностей выполнения операций каждого из множеств последовательности, составляющей цикл. Выбор осуществлялся с целью максимизации прибыли либо минимизации затрат на выпуск партии изделий и логистику при обеспечении требуемой производительности линии при заданной ее конфигурации [94–98] либо с одновременным выбором варианта оборудования линии [99, 100]. Для решения задач разработаны декомпозиционные методы [95–98, 100], алгоритмы и экспериментальное программное обеспечение [94, 99]. Созданы также модель и декомпозиционный метод оптимизации динамически изменяемых режимов групповой обработки деталей резанием на многопозиционном многоинструментальном оборудовании в зависимости от типа детали [101].

**Оптимизация инфраструктуры и функционирования электротранспорта.** Изменение климата и рост онкологических заболеваний являются основными причинами замены традиционного общественного транспорта электрическим. Наиболее широко в мировой практике применялись системы городского электротранспорта, основанные на технологиях быстрой зарядки электробусов с аккумуляторами малой емкости на остановках маршрутов либо медленной зарядки в депо для электробусов с аккумуляторами большой емкости. Для задач оптимального выбора гетерогенного парка электробусов и его зарядной инфраструктуры с технологией быстрой зарядки для заданного набора городских маршрутов разработана серия математических моделей оптимизационных задач, точные и приближенные методы их решения [102–105]. Для задачи выбора состава разнотипных станций медленной зарядки в депо, вариантов аккумуляторов для электробусов нескольких типов, обслуживающих набор городских маршрутов, а также циклического суточного расписания их зарядки в депо предложена двухуровневая декомпозиционная схема решения из взаимосвязанных подзадач в форме смешанного целочисленного линейного программирования [106]. На базе полученных результатов в рамках европейского проекта создана информационная система поддержки принятия решений при планировании перехода городского общественного транспорта на электробусы [102–106]. Разработана также эффективная модель смешанного целочисленного линейного программирования для оптимизации конфигурации зарядной инфраструктуры в составе контактной сети маршрутов и стационарных зарядных станций для автономных троллейбусов, оборудованных батареями повышенной емкости [107].



Участники Восьмой Международной научной конференции «Танаевские чтения» (2018 г.)



Участники Минского семинара (2019 г.) по международному исследовательскому проекту PLATON (от ОИПИ НАН Беларуси – М. Я. Ковалев, Я. М. Шафранский, Н. Н. Гущинский, Б. М. Розин)

**Логистика и цены в Интернете.** *Транспортная и складская логистика.* Модели и методы исследования операций являются основными инструментами решения задач логистики. В области контейнерной логистики разработаны математические модели, алгоритмы и экспериментальное программное обеспечение решения задач складирования контейнеров [108], а также их инспекции и ремонта [109, 110]. Исследована сложность и разработаны приближенные алгоритмы решения задач, связанных с управлением работой подъемных кранов, перемещающих контейнеры на железнодорожном терминале [111, 112].

*Оптимальная маршрутизация.* В задачах маршрутизации необходимо найти маршруты (пути) объектов между заданными вершинами транспортной сети с целью минимизации либо максимизации некоторых функций, зависящих от параметров сегментов (дуг) этой сети. Установлена вычислительная сложность и разработаны эффективные алгоритмы решения задач маршрутизации вертолетов с целью минимизации суммарного риска [113], поиска маршрутов с заданными и запрещенными значениями длины [114], двухкритериальной задачи отыскания пути [115] и отыскания лучшего с точки зрения нескольких критериев маршрута пешехода [116].

*Динамическое ценообразование.* Развитие Интернета и информационных технологий привело к созданию виртуальных систем бронирования и оплаты за различные услуги, например за билеты на самолет или театральное представление. Разработаны математическая модель, алгоритмы и экспериментальная информационная система гибкого ценообразования гостиницы, которая позволяет определять динамические (зависящие от времени) цены на номера как функции от неопределенного спроса и ресурсных ограничений с целью максимизации доходов [117–119]. Система прошла успешное тестирование на данных одной из гостиниц Минска.

*Оптимизация покупок в Интернете.* В настоящее время все больше людей отдают предпочтение покупкам в Интернете. Предложены математическая модель и алгоритмы решения задачи минимизации стоимости покупки набора товаров в разных интернет-магазинах при условии различных цен товара и его доставки, а также скидок от общей стоимости [120].

**Защиты диссертаций.** При выполнении исследований были защищены следующие диссертации:

Бондоловский А. М. – диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук «Модели управления доходами гостиничного бизнеса» по специальности 08.00.13 – «Математические и инструментальные методы экономики» (23.11.2016), научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор М. Я. Ковалев.

Голами О. – диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Алгоритмы обслуживания требований с различными маршрутами последовательными и параллельными приборами и их применение для составления расписаний поездов» по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (18.03.2014), научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Ю. Н. Сотсков.

Хасани К. – диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Математические модели и эвристические алгоритмы для обслуживающих систем с параллельными приборами и сервером» по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (22.04.2014), научный руководитель – кандидат физико-математических наук С. А. Кравченко.

**Благодарность.** Работа Ю. Н. Сотскова выполнена при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Ф23РНФ-017).

### Публикации

1. Kovalyov, M. Y. Scientific school of academician V. S. Tanaev: Results on the scheduling theory / M. Y. Kovalyov, Y. N. Sotсков, Y. M. Shafransky // Automation and Remote Control. – 2014. – Vol. 75, no. 7. – P. 1241–1256.

2. Aloulou, M. A. A bibliography of non-deterministic lot-sizing models / M. A. Aloulou, A. Dolgui, M. Y. Kovalyov // International Journal of Production Research. – 2014. – Vol. 52, no. 8. – P. 2293–2310.

3. Kovalyov, M. Y. An  $O(n \log n)$  algorithm for a single-item capacitated lot-sizing problem with linear costs and no backlogging / M. Y. Kovalyov, E. Pesch // *International Journal of Production Research*. – 2014. – Vol. 52, no. 13. – P. 3758–3761.
4. Kovalyov, M. Y. A batching machine model for lot scheduling on a single machine / M. Y. Kovalyov // *Foundations of Computing and Decision Sciences*. – 2018. – Vol. 43, no. 1. – P. 37–40.
5. Kovalyov, M. Y. Two-agent scheduling with agent specific batches on an unbounded serial batching machine / M. Y. Kovalyov, A. Oulamara, A. Soukhal // *Journal of Scheduling*. – 2014. – Vol. 18. – P. 423–434.
6. Kovalyov, M. Y. Two-agent scheduling with deteriorating jobs on a singleparallel-batching machine: refining computational complexity / M. Y. Kovalyov, D. Sesok // *Journal of Scheduling*. – 2019. – Vol. 22, no. 5. – P. 603–606.
7. Ereemeev, A. V. Lot-size scheduling of a single product on unrelated parallel machines / A. V. Ereemeev, M. Y. Kovalyov, P. M. Kuznetsov // *Optimization Letters*. – 2020. – Vol. 14, no. 3. – P. 557–568.
8. Janiak, A. Due window assignment and scheduling on parallel machines: a FPTAS for a bottleneck criterion / A. Janiak, W. Janiak, M. Y. Kovalyov // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. – 2014. – Vol. 62, no. 4. – P. 805–808.
9. Single machine scheduling with assignable due dates to minimize maximum and total late work / J.-E. Justkowiak, S. Kovalev, M. Y. Kovalyov, E. Pesch // *European Journal of Operational Research*. – 2023. – Vol. 308, no. 1. – P. 76–83.
10. Fixed interval scheduling with third-party machines / I. Fridman, M. Y. Kovalyov, E. Pesch, A. Ryzhikov // *Networks*. – 2021. – Vol. 77. – P. 361–371.
11. No-idle parallel-machine scheduling of unit-time jobs with a small number of distinct release dates and deadlines / N. Brauner, M. Y. Kovalyov, A. Quilliot, H. Toussaint // *Computers and Operations Research*. – 2021. – Vol. 132. – Art. 105315.
12. Alternative algorithms for identical machines scheduling to maximize total early work with a common due date / X. Chen, X. Shen, M. Y. Kovalyov [et al.] // *Computers and Industrial Engineering*. – 2022. – Vol. 171. – Art. 108386.
13. Kress, D. Single-machine batch scheduling to minimize the total setup cost in the presence of deadlines / D. Kress, M. S. Barketau, E. Pesch // *Journal of Scheduling*. – 2018. – Vol. 21. – P. 595–606.
14. Kovalyov, M. Y. A game mechanism for single machine sequencing with zero risk / M. Y. Kovalyov, E. Pesch // *OMEGA*. – 2014. – Vol. 44. – P. 104–110.
15. A parallel machine schedule updating game with compensations and clients averse to uncertain loss / M. Y. Kovalyov, D. Kress, S. Meiswinkel, E. Pesch // *Computers and Operations Research*. – 2019. – Vol. 103. – P. 148–157.
16. Kovalyov, M. Y. Provision-after-wait with preferences ordered by difference: Tighter complexity and better approximation / M. Y. Kovalyov, E. Pesch, A. Quilliot // *European Journal of Operational Research*. – 2021. – Vol. 289. – P. 1008–1012.
17. Gurevsky, E. Min-max controllable risk problems/ E. Gurevsky, S. Kovalev, M. Y. Kovalyov // *4OR*. – 2021. – Vol. 19. – P. 93–101.
18. Min-sum controllable risk problems with concave risk functions of the same value range / E. Gurevsky, D. Kopelevich, S. Kovalev, M. Y. Kovalyov // *Networks*. – 2022. – Vol. 79. – P. 105–116.
19. Halman, N. Max–max, max–min, min–max and min–min knapsack problems with a parametric constraint / N. Halman, M. Y. Kovalyov, A. Quilliot // *4OR*. – 2023. – Vol. 21. – P. 235–246.
20. Brauner, N. A single representative min-max-min robust selection problem with alternatives and budgeted uncertainty / N. Brauner, E. Gurevsky, M. Y. Kovalyov // *Discrete Applied Mathematics*. – 2024. – Vol. 349. – P. 106–112.
21. Bi-criteria sequencing of courses and formation of classes for a bottleneck classroom // O. G. Czibula, H. Gu, F.-J. Hwang [et al.] // *Computers and Operations Research*. – 2016. – Vol. 65. – P. 53–63.
22. Matsveichuk, N. M. A stability approach to two-stage scheduling problems with uncertain processing times / N. M. Matsveichuk, Yu. N. Sotskov // *Sequencing and Scheduling with Inaccurate Data* / ed.: Yu. N. Sotskov, F. Werner. – NY, Hauppauge : Nova Science Publishers, 2014. – P. 377–407.
23. Sotskov, Yu. N. A stability approach in sequencing and scheduling / Yu. N. Sotskov // *Sequencing and Scheduling with Inaccurate Data* / ed.: Yu. N. Sotskov, F. Werner. – NY, Hauppauge : Nova Science Publishers, 2014. – P. 283–344.
24. Sotskov, Y. N. Sequencing and Scheduling with Inaccurate Data / Y. N. Sotskov, F. Werner. – NY, Hauppauge : Nova Science Publishers, 2014. – 433 p.

25. Sotskov, Yu. N. Stability of a schedule minimising the makespan for processing jobs on identical machines / Yu. N. Sotskov // *International Journal of Production Research*. – 2023. – Vol. 61, no. 19. – P. 6434–6450.
26. Sotskov, Yu. N. Stability polyhedra of optimal permutation of jobs servicing / Yu. N. Sotskov, N. G. Egorova // *Automation and Remote Control*. – 2014. – Vol. 75, no. 7. – P. 1267–1282.
27. Lawler's minmax cost algorithm: optimality conditions and uncertainty / N. Brauner, G. Finke, Y. Shafransky, D. Sledneu // *Journal of Scheduling*. – 2016. – Vol. 19. – P. 401–408.
28. Brauner, N. Lawler's minmax cost problem under uncertainty / N. Brauner, G. Finke, Y. Shafransky // *Journal of Combinatorial Optimization*. – 2017. – Vol. 34 (1). – P. 31–46.
29. The optimality box in uncertain data for minimizing the sum of the weighted job completion times / T.-C. Lai, Yu. N. Sotskov, N. G. Egorova, F. Werner // *International Journal of Production Research*. – 2018. – Vol. 56, no. 19. – P. 6336–6362.
30. Sotskov, Yu. N. Single machine scheduling problem with interval processing times and total completion time objective / Yu. N. Sotskov, N. G. Egorova // *Algorithms*. – 2018. – Vol. 11. – P. 21–40.
31. Sotskov, Yu. N. The optimality region for a single-machine scheduling problem with bounded durations of the jobs and the total completion time objective / Yu. N. Sotskov, N. G. Egorova // *Mathematics*. – 2019. – Vol. 7, no. 382. – P. 1–21.
32. Сотсков, Ю. Н. Алгоритмы планирования рабочего времени в условиях интервальной неопределенности / Ю. Н. Сотсков, Н. Г. Егорова, Н. М. Матвейчук // *Информатика*. – 2019. – Т. 17, № 2. – С. 86–102.
33. Shafransky, Y. On the complexity of constructing a minmax regret solution for the two-machine flow shop problem under the interval uncertainty / Y. Shafransky, V. Shinkarevich // *Journal of Scheduling*. – 2020. – Vol. 23. – P. 745–749.
34. Fridman, I. Minimizing maximum cost for a single machine under uncertainty of processing times / I. Fridman, E. Pesch, Y. Shafransky // *European Journal of Operational Research*. – 2020. – Vol. 286(2). – P. 444–457.
35. Sotskov, Yu. N. Schedule execution for two-machine job-shop to minimize makespan with uncertain processing times / Yu. N. Sotskov, N. M. Matsveichuk, V. D. Hatsura // *Mathematics*. – 2020. – Vol. 8, no. 1314. – P. 1–51.
36. Sotskov, Yu. N. Optimality region for job permutation in single-machine scheduling with uncertain processing times / Yu. N. Sotskov // *Automation and Remote Control*. – 2020. – Vol. 81, no. 5. – P. 819–842.
37. Sotskov, Yu. N. Two-machine job-shop scheduling problem to minimize the makespan with uncertain job durations / Yu. N. Sotskov, N. M. Matsveichuk, V. D. Hatsura // *Algorithms*. – 2020. – Vol. 13, no. 4. – P. 1–45.
38. Sotskov, Yu. N. Optimal selection and scheduling of jobs with uncertain durations for two employees / Yu. N. Sotskov, N. M. Matsveichuk // *Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика*. – 2024. – № 2. – С. 65–80.
39. Матвейчук, Н. М. Модели и методы календарного планирования и контроля выплавки и непрерывной разливки стали в условиях неопределенности данных / Н. М. Матвейчук, Ю. Н. Сотсков // *Вестник Фонда фундаментальных исследований*. – 2024. – № 2. – С. 176–191.
40. Barketau, M. S. Evaluation of solution of discrete optimization problem with incomplete input / M. S. Barketau // *Optimization Letters*. – 2021. – Vol. 15. – P. 431–440.
41. Scheduling arbitrary number of malleable tasks on multiprocessor systems / M. S. Barketau, M. Y. Kovalyov, J. Weglarz, M. Machowiak // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. – 2014. – Vol. 62, no. 2. – P. 255–261.
42. Hwang, F. J. Scheduling for fabrication and assembly in a two-machine flowshop with a fixed job sequence / F. J. Hwang, M. Y. Kovalyov, B. M. T. Lin // *Annals of Operations Research*. – 2014. – Vol. 217, no. 1. – P. 263–279.
43. Janiak, A. On a single machine-scheduling problem with separated position and resource effects / A. Janiak, M. Y. Kovalyov, M. Lichtenstein // *Optimization*. – 2015. – Vol. 64, no. 4. – P. 909–911.
44. Semi-V-shape property for two-machine no-wait proportionate flow shop problem with TADC criterion / S. Kovalev, M. Y. Kovalyov, G. Mosheiov, E. Gerstl // *International Journal of Production Research*. – 2019. – Vol. 57, no. 2. – P. 560–566.
45. Kononov, A. V. Minimizing machine assignment costs over  $\Delta$ -approximate solutions of the scheduling problem  $P||C_{\max}$  / A. V. Kononov, M. Y. Kovalyov, B. M. T. Lin // *Theoretical Computer Science*. – 2019. – Vol. 793. – P. 70–78.
46. Three parallel task assignment problems with shared resources / A. Diabat, A. Dolgui, W. Janiak, M. Y. Kovalyov // *IIE Transactions*. – 2020. – Vol. 52, no. 4. – P. 478–485.



47. A note on scheduling identical parallel machines with preemptions and setup times / M. Boudhar, A. Dolgui, A. Haned [et al.] // *International Journal of Production Research*. – 2024. – Vol. 62. – Art. 2362414. – DOI: 10.1080/00207543.2024.2362414.
48. Рубанов, И. В. Модель построения расписания непрерывного движения объектов по сети пересекающихся маршрутов / И. В. Рубанов, М. С. Баркетов, М. Я. Ковалев // *Информатика*. – 2018. – № 1(15). – С. 21–33.
49. Рубанов, И. В. Методы поиска нескольких решений системы разностных и интервальных ограничений / И. В. Рубанов, М. С. Баркетов, М. Я. Ковалев // *Информатика*. – 2016. – № 3(51). – С. 67–79.
50. Barketau, M. S. An approximation algorithm for a special case of the asymmetric travelling salesman problem / M. S. Barketau, E. Pesch // *International Journal of Production Research*. – 2016. – Vol. 54, iss. 14. – P. 4205–4212.
51. Баркетов, М. С. Полиномиальный рандомизированный алгоритм для задачи «Асимметричный коммивояжер» / М. С. Баркетов // *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. – 2022. – Т. 66, № 5. – С. 489–494.
52. Баркетов, М. С. Определение параметров заявок клиентов в цепи производства и поставок / М. С. Баркетов // *Экономика, моделирование, прогнозирование : сб. тр. / Науч.-исслед. эконом. ин-т М-ва экономики Респ. Беларусь*. – 2015. – С. 105–112.
53. Шафранский, Я. М. Построение расписания работы отделочной фабрики / Я. М. Шафранский, В. И. Романов // *Танаевские чтения : докл. Девятой Междунар. науч. конф., Минск, 30 марта 2021 г.* – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2021. – С. 137–141.
54. Шафранский, Я. М. Особенности построения расписания работы отделочной фабрики (на примере ОАО «Моготекс») / Я. М. Шафранский, В. И. Романов // *Информационные технологии в промышленности, логистике и социальной сфере : докл. XII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21–22 сент. 2023 г.* – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2023. – С. 169–172.
55. Hasani, K. Minimizing interference for scheduling two parallel machines with a single server / K. Hasani, S. A. Kravchenko, F. Werner // *International Journal of Production Research*. – 2014. – Vol. 52, no 24. – P. 7148–7158.
56. Hasani, K. Block Models for Scheduling Jobs on Two Parallel Machines with a Single Server / K. Hasani, S. A. Kravchenko, F. Werner // *Computers & Operations Research*. – Vol. 41. – 2014. – P. 94–97.
57. Hasani, K. Simulated Annealing and Genetic Algorithms for the Two-Machine Scheduling Problem with a Single Server / K. Hasani, S.A. Kravchenko, F. Werner // *International Journal of Production Research*. – 2014. – Vol. 52, no. 13. – P. 3778–3792.
58. Hasani, K. Minimizing total weighted completion time approximately for the parallel machine problem with a single server / K. Hasani, S. A. Kravchenko, F. Werner // *Information Processing Letters*. – 2014. – Vol. 114. – P. 500–503.
59. Hasani, K. A hybridization of harmony search and simulated annealing to minimize mean flow time for the two-machine scheduling problem with a single server / K. Hasani, S. A. Kravchenko, F. Werner // *International Journal of Operational Research Nepal (IJORN)*. – 2014. – Vol. 3, no. 1. – P. 9–26.
60. Вернер, Ф. Минимизация суммарного времени обслуживания для системы с двумя приборами и одним / Ф. Вернер, С. А. Кравченко, К. Хасани // *Информатика*. – 2014. – Т. 41, № 1. – P. 15–24.
61. Hasani, K. Minimizing the makespan for the two-machine scheduling problem with a single server: Two algorithms for very large instances / K. Hasani, S. A. Kravchenko, F. Werner // *Engineering Optimization*. – 2016. – Vol. 48, no. 1. – P. 173–183.
62. Cheng, T. C. E. Preemptive parallel-machine scheduling with a common server to minimize makespan / T. C. E. Cheng, S. A. Kravchenko, B. M. T. Lin // *Naval Research Logistics*. – 2017. – Vol. 64, no. 5. – P. 388–398.
63. Cheng, T. C. E. Server scheduling on parallel dedicated machines with fixed job sequences / T. C. E. Cheng, S. A. Kravchenko, B. M. T. Lin // *Naval Research Logistics*. – 2019. – Vol. 66, no. 4. – P. 321–332.
64. Gholami, O. A neural network algorithm for servicing jobs with sequential and parallel machines / O. Gholami, Yu. N. Sotskov // *Automation and Remote Control*. – 2014. – Vol. 75, no. 7. – P. 1203–1220.
65. Gholami, O. Solving parallel machines job-shop scheduling problems by an adaptive algorithm / O. Gholami, Yu. N. Sotskov // *International Journal of Production Research*. – 2014. – Vol. 52, no. 13. – P. 3888–3904.
66. Gholami, O. A fast heuristic algorithm for solving parallel-machine job-shop scheduling problems / O. Gholami, Yu. N. Sotskov // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 70, no. 1–4. – P. 531–546.

67. Gholami, O. Scheduling algorithm with controllable train speeds and departure times to decrease the total train tardiness / O. Gholami, Yu. N. Sotskov // *International Journal of Industrial Engineering Computations*. – 2014. – Vol. 5. – P. 281–294.
68. Gholami, O. Mixed graph model and algorithms for parallel-machine job-shop scheduling problems / O. Gholami, Yu. N. Sotskov // *International Journal of Production Research*. – 2017. – Vol. 55, no. 6. – P. 1549–1564.
69. Gholami, O. A genetic algorithm for hybrid job-shop scheduling problems with minimizing the makespan or mean flow time / O. Gholami, Yu. N. Sotskov, F. Werner // *Journal of Advanced Manufacturing Systems*. – 2018. – Vol. 17, no. 4. – P. 461–486.
70. Sotskov, Yu. N. Mixed graph colorings: A historical review / Yu. N. Sotskov // *Mathematics*. – 2020. – Vol. 8, no. 385. – P. 1–24.
71. Sotskov, Y. N. Mixed graph coloring as scheduling multi-processor tasks with equal processing times / Y. N. Sotskov // *Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика*. – 2021. – № 2. – С. 67–81.
72. Sotskov, Yu. N. Scheduling multiprocessor tasks with equal processing times as a mixed graph coloring problem / Yu. N. Sotskov, E. I. Mihova // *Algorithms*. – 2021. – Vol. 14, no. 246. – P. 1–22.
73. Sotskov, Yu. N. A makespan-optimal schedule for processing jobs with possible operation preemptions as an optimal mixed graph coloring. / Yu. N. Sotskov // *Automation and Remote Control*. – 2023. – Vol. 84, no. 2. – P. 167–186.
74. Mihova, E. I. Mixed graph coloring as scheduling a partially ordered set of interruptible multi-processor tasks with integer due dates / E. I. Mihova, Yu. N. Sotskov // *Algorithms*. – 2024. – Vol. 17, no. 299. – P. 1–33.
75. Cheng, T. C. E. An alternative approach for proving the NP-hardness of optimization problems / T. C. E. Cheng, Y. Shafransky, C. T. Ng // *European Journal of Operational Research*. – 2016. – Vol. 248. – P. 52–58.
76. Profitability of a multi-model manufacturing line versus multiple dedicated lines / A. Dolgui, S. E. Hashemi-Petroodi, S. Kovalev, M. Y. Kovalyov // *International Journal of Production Economics*. – 2021. – Vol. 236. – Art. 108113.
77. Minimizing the number of workers in a paced mixed-model assembly line / X. Delorme, A. Dolgui, S. Kovalev, M. Y. Kovalyov // *European Journal of Operational Research*. – 2019. – Vol. 272, no. 1. – P. 188–194.
78. Minimizing setup costs in a transfer line design problem with sequential operation processing / A. Dolgui, S. Kovalev, M. Y. Kovalyov [et al.] // *International Journal of Production Economics*. – 2014. – Vol. 151. – P. 186–194.
79. Workforce reconfiguration strategies in manufacturing systems: a state of the art / S. E. Hashemi-Petroodi, A. Dolgui, S. Kovalev [et al.] // *International Journal of Production Research*. – 2021. – Vol. 59, no. 22. – P. 6721–6744.
80. Optimal workforce assignment to operations of a paced assembly line / A. Dolgui, S. Kovalev, M. Y. Kovalyov [et al.] // *European Journal of Operational Research*. – 2018. – Vol. 264. – P. 200–211.
81. Sotskov, Y. N. Assembly and production line designing, balancing and scheduling with inaccurate data: a survey and perspectives / Y. N. Sotskov // *Algorithms*. – 2023. – Vol. 16, no. 100. – P. 1–43.
82. Guschinsky, N. N. On optimization of processes for sequential batch machining / N. N. Guschinsky, O. Battaia, A. Dolgui // *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-матэматычных навук*. – 2016. – № 4. – С. 106–115.
83. Battaia, O. Decision support for design of reconfigurable rotary machining systems for family part production / O. Battaia, A. Dolgui, N. Guschinsky // *International Journal of Production Research*. – 2017. – Vol. 55, no. 5. – P. 1368–1385.
84. Battaia, O. Integrated process planning and system configuration for mixed-model machining on rotary transfer machine / O. Battaia, A. Dolgui, N. Guschinsky // *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. – 2017. – Vol. 30, no. 9. – P. 910–925.
85. Battaia, O. MIP-based heuristics for combinatorial design of reconfigurable rotary transfer machines for production of multiple parts / O. Battaia, A. Dolgui, N. Guschinsky // *International Journal of Production Economics*. – 2023. – Vol. 262(1). – Art. 108904. – DOI: 10.1016/j.ijpe.2023.108904.
86. Combinatorial techniques to optimally customize an automated production line with rotary transfer and turrets // O. Battaia, A. Dolgui, N. Guschinsky, G. Levin // *IIE Transactions*. – 2014. – Vol. 46, no. 9. – P. 867–879.
87. Integrated configurable equipment selection and line balancing for mass production with serial–parallel machining systems // O. Battaia, A. Dolgui, N. Guschinsky, G. Levin // *Engineering Optimization*. – 2014. – Vol. 46, no. 10. – P. 1369–1388.

88. Variety-oriented design of rotary production systems / O. Battaia, D. Brissaud, A. Dolgui, N. Guschinsky // *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. – 2015. – Vol. 64, no. 1. – P. 411–414.
89. Гущинский, Н. Н. Модели и методы синтеза структуры технологического процесса обработки деталей на поточной линии из станков со стационарным приспособлением / Н. Н. Гущинский, О. Баттаиа, А. Долгий // *Информатика*. – 2015. – № 3. – С. 72–80.
90. Battaia, O. Optimal cost design of flow lines with reconfigurable machines for batch production / O. Battaia, A. Dolgui, N. Guschinsky // *International Journal of Production Research*. – 2020. – Vol. 58, no. 10. – P. 2937–2952.
91. Battaia, O. Design of reconfigurable machining lines: A novel comprehensive / O. Battaia, A. Dolgui, N. Guschinsky // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2021. – Vol. 70, no. 1. – P. 393–398.
92. Гущинский, Н. Н. Оптимизация размещения детали на многопозиционном поворотном столе агрегатного станка / Н. Н. Гущинский, В. Е. Зданович, Б. М. Розин // *Информатика*. – 2015. – № 4. – С. 57–72.
93. Гущинский, Н. Н. Оптимизация размещения группы деталей на многопозиционном поворотном столе агрегатного станка / Н. Н. Гущинский, Б. М. Розин // *Информатика*. – 2017. – № 1. – С. 53–69.
94. Cost optimization for series-parallel execution of a collection of intersecting operation sets / A. Dolgui, G. Levin, B. Rozin, I. Kasabutski // *Engineering Optimization*. – 2016. – Vol. 48, no. 5. – P. 756–771.
95. Левин, Г. М. Линейная аппроксимация задачи оптимизации интенсивностей последовательно-параллельного выполнения пересекающихся множеств операций / Г. М. Левин, Б. М. Розин, А. Б. Долгий // *Информатика*. – 2014. – № 3. – С. 44–51.
96. Левин, Г. М. Оптимизация агрегирования и режимов последовательно-параллельного выполнения пересекающихся множеств операций / Г. М. Левин, Б. М. Розин, А. Б. Долгий // *Информатика*. – 2016. – № 1. – С. 5–13.
97. Левин, Г. М. Оптимизация выпуска и интенсивностей обработки группы деталей при нестационарном спросе / Г. М. Левин, Б. М. Розин, А. Б. Долгий // *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-матэматычных навук*. – 2016. – № 3. – С. 102–109.
98. Левин, Г. М. Оптимизация выпуска комплектов изделий и интенсивностей их изготовления в условиях случайного спроса / Г. М. Левин, Б. М. Розин // *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-матэматычных навук*. – 2017. – № 2. – С. 110–118.
99. Dolgui, A. Optimisation of the aggregation and execution rates for intersecting operation sets: an example of machining process design / A. Dolgui, G. Levin, B. Rozin // *International Journal of Production Research*. – 2020. – Vol. 58, no 9. – P. 2658–2676.
100. Dolgui, A. Structural-Parametric Optimization of a Complex of Intersecting Sets of Operations under Nonstationary Demand / A. Dolgui, G. Levin, B. Rozin // *Automation and Remote Control*. – 2020. – Vol. 81, no. 5. – P. 791–802.
101. Левин, Г. М. Оптимизация динамически изменяемых режимов групповой обработки резанием на многопозиционном многоинструментальном оборудовании / Г. М. Левин, Б. М. Розин, О. И. Стеблинская // *Информатика*. – 2014. – № 4. – С. 90–99.
102. Designing fast-charge urban electric bus services: An Integer Linear Programming model / O. Battaia, A. Dolgui, N. Guschinsky, M. Y. Kovalev // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. – 2023. – Vol. 171. – Art. 103065. – DOI: 10.1016/j.tre.2023.103065.
103. MILP model for fleet and charging infrastructure decisions for fast-charging city electric bus services / O. Battaia, A. Dolgui, N. Guschinsky, B. Rozin // *Computers and Industrial Engineering*. – 2023. – Vol. 182. – Art. 109336. – DOI: 10.1016/j.cie.2023.109336.
104. Fleet and charging infrastructure decisions for fast-charging city electric bus service / N. Guschinsky, M. Y. Kovalyov, B. Rozin, N. Brauner // *Computers and Operations Research*. – 2021. – Vol. 135. – Art. 105449. – DOI: 10.1016/j.cor.2021.105449.
105. Kovalyov, M. Y. Mathematical Model and Random Search Algorithm for the Optimal Planning Problem of Replacing Traditional Public Transport with Electric / M. Y. Kovalyov, B. M. Rozin, N. N. Guschinsky // *Automation and Remote Control*. – 2020. – Vol. 81, no. 5. – P. 803–818.
106. Cost minimizing decisions on equipment and charging schedule for electric buses in a single depot / N. Guschinsky, M. Y. Kovalyov, E. Pesch, B. Rozin // *Transportation Research Part E*. – 2023. – Vol. 180. – Art. 103337. – DOI: 10.1016/j.tre.2023.103337.
107. Ковалев, М. Я. Подход к оптимизации зарядной инфраструктуры автономных троллейбусов для городских маршрутов / М. Я. Ковалев, Б. М. Розин, И. А. Шатерник // *Информатика*. – 2021. – Т. 18, № 4. – С. 79–95.
108. Kovalyov, M. Y. A note on scheduling container storage operations of two non-passing stacking cranes / M. Y. Kovalyov, E. Pesch, A. Ryzhikov // *Networks*. – 2018. – Vol. 71, no. 3. – P. 271–280.

109. Planning container inspection and repair: A case study / M. Y. Kovalyov, K. A. Kuzmicz, M. N. Lukashevich, E. Pesch // *Computers and Operations Research*. – 2024. – Vol. 164. – Art. 106555.
110. Kovalyov, M. Y. Cost minimizing planning of container inspection and repair in multiple facilities / M. Y. Kovalyov, M. N. Lukashevich, E. Pesch // *OR Spectrum*. – 2023. – Vol. 45, no. 1. – P. 181–204.
111. Barketau, M. S. Minimizing maximum weight of subsets of a maximum matching in a bipartite graph / M. S. Barketau, E. Pesch, Y. M. Shafransky // *Discrete Applied Mathematics*. – 2015. – Vol. 196. – P. 4–19.
112. Barketau, M. S. Scheduling dedicated jobs with variative processing times / M. S. Barketau, E. Pesch, Y. M. Shafransky // *Journal of Combinatorial Optimization*. – 2016. – Vol. 31. – P. 774–785.
113. Gribkovskaia, I. Minimizing takeoff and landing risk in helicopter pickup and delivery operations / I. Gribkovskaia, O. Halskau, M. Y. Kovalyov // *Omega*. – 2015. – Vol. 55. – P. 73–80.
114. Dolgui, A. Simple paths with exact and forbidden lengths / A. Dolgui, M. Y. Kovalyov, A. Quilliot // *Naval Research Logistics*. – 2018. – Vol. 65, no. 1. – P. 78–85.
115. Bi-criteria path problem with minimum length and maximum survival probability / N. Halman, M. Y. Kovalyov, A. Quilliot [et al.] // *OR Spectrum*. – 2019. – Vol. 41, no. 2. – P. 469–489.
116. Naumann, S. Pedestrian route search based on OpenStreet Map / S. Naumann, M. Y. Kovalyov // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2016. – Vol. 505. – P. 87–96.
117. A graph-theoretic approach to interval scheduling on dedicated unrelated parallel machines / C. T. Ng, T. C. E. Cheng, A. Bandalouski [et al.] // *Journal of the Operational Research Society*. – 2014. – Vol. 65, no. 14. – P. 1571–1579.
118. An overview of revenue management and dynamic pricing models in hotel business / A. M. Bandalouski, M. Y. Kovalyov, E. Pesch, S. A. Tarim // *RAIRO – Operations Research*. – 2018. – Vol. 52, no. 1. – P. 119–141.
119. Dynamic pricing with demand disaggregation for hotel revenue management / A. M. Bandalouski, N. G. Egorova, M. Y. Kovalyov [et al.] // *Journal of Heuristics*. – 2021. – Vol. 27. – P. 869–885.
120. Internet shopping with price sensitive discounts / J. Blazewicz, P. Bouvry, M. Y. Kovalyov, J. Musial // *4OR – Quarterly Journal of Operational Research*. – 2014. – Vol. 12. – P. 35–48.