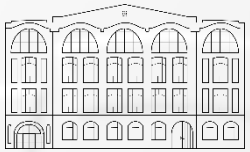
St Petersburg
Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences



St Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences

Methodology and Technologies for Proactive Control of Space Edge Computing

Head of Laboratory and Chief Research Scientist, SPIIRAS, SPC RAS

DSc, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation

Boris V. Sokolov

St Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), St Petersburg

http://www.spiiras.nw.ru

http://litsam.ru

https://www.simulation.su

sokolov_boris@inbox.ru

Outline

1. *Introduction*
2. *Problem description and mathematical formulation*
3. *Methodological foundations and solution methods*
4. *Applications of proactive control to computing in satellite constellations*
5. *Conclusions*

SPIRAS

1. Introduction

Trends in the development and use of satellite constellations

- In the second half of 2026, Earth orbit hosted approximately 12,885 *US satellites (including over 10,900 Starlink satellites), 1,503 Chinese, 760 UK, 385 Russian, 100 French and 69 German satellites [https://www.unoosa.org/oosa/osoindex/search-ng.jspx?lf_id=].*
- Most satellites (nearly 5,000) support communications and data transmission, primarily through Starlink. More than 1,2*00 perform Earth observation, including Planet (USA), with over 520 satellites, and Spire Global (USA), with over 150.*
- Annual launches increased from 214 satellites in 2014 to approximat*ely 2,90*0 in 2023, with growth continuing *[Ferrari, B., 2024].*
- Small satellites have accounted for more than 95% of satellites launched in recent y*ears [htt*ps://brycetech.com/reports].

Small-satellite classification

Common classification in Russia:

- ✓ Minisatellites: 100–500 kg
- ✓ Microsatellites: 20–100 kg
- ✓ Nanosatellites: 1–20 kg
- ✓ Picosatellites: 0.1–1 kg
- ✓ Femtosatellites: below 0.1 kg

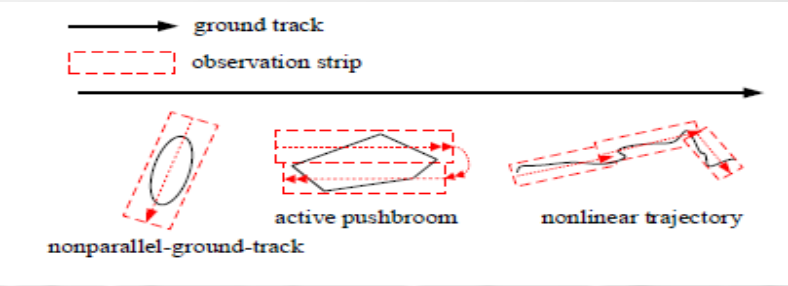
International classification:

	Mass Class Name	Kilograms (kg)
Smallsats	Femto	0.01 – 0.09
	Pico	0.1 – 1
	Nano	1.1 – 10
	Micro	11 – 200
	Mini	201 – 600
	Small	601 – 1,200
	Medium	1,201 – 2,500
	Intermediate	2,501 – 4,200
	Large	4,201 – 5,400
	Heavy	5,401 – 7,000
	Extra Heavy	> 7,001

From FAA *The Annual Compendium of Commercial Space Transportation: 2018*

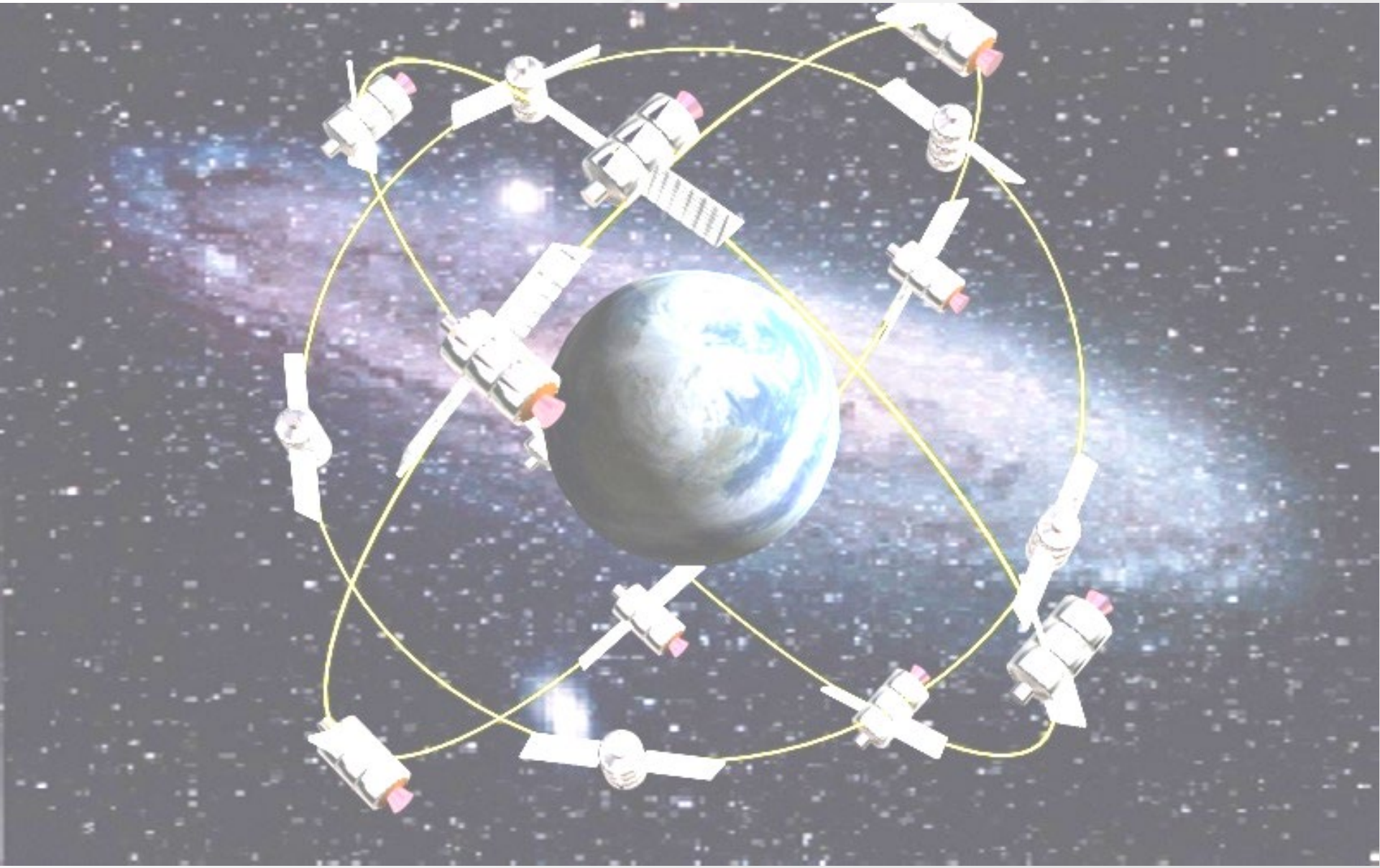
Small-satellite capabilities and development trends

- Greater onboard control capabilities through faster processors and increased memory capacity
- Greater resilience to the space environment
- Improved maneuverability through agile and super-agile small satellites

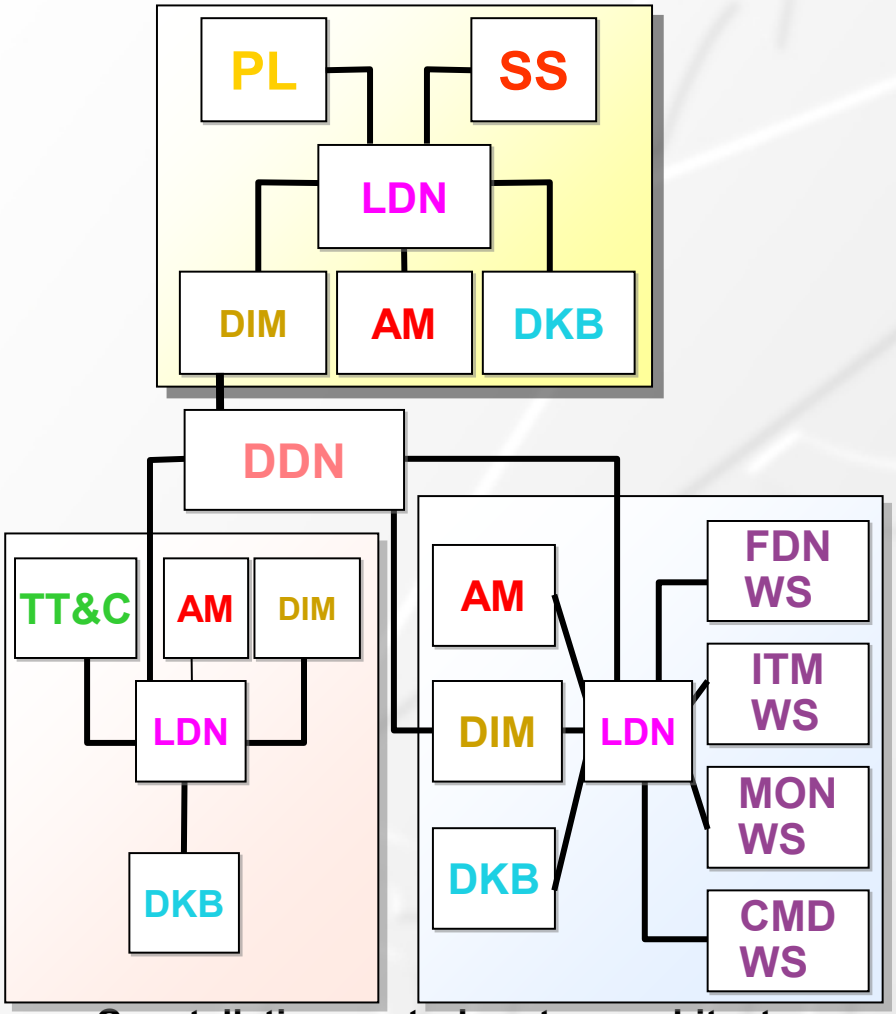


- Structural and functional redundancy in constellation and ground-control resources for mission execution
- *Integration of small satellites into heterogeneous constellations*

Example of a satellite constellation topology



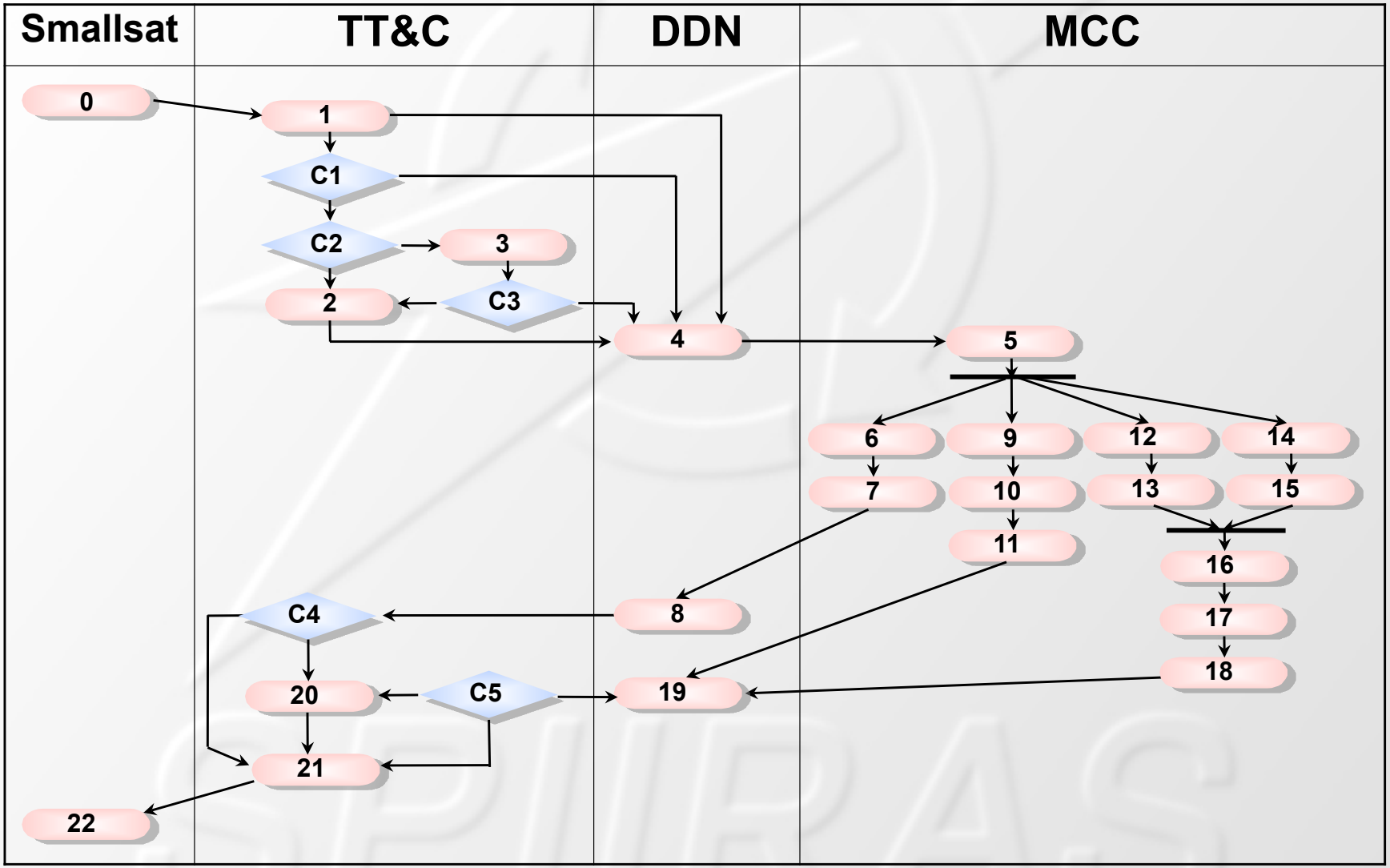
Example architecture of a satellite constellation and its ground control segment



Constellation control system architecture

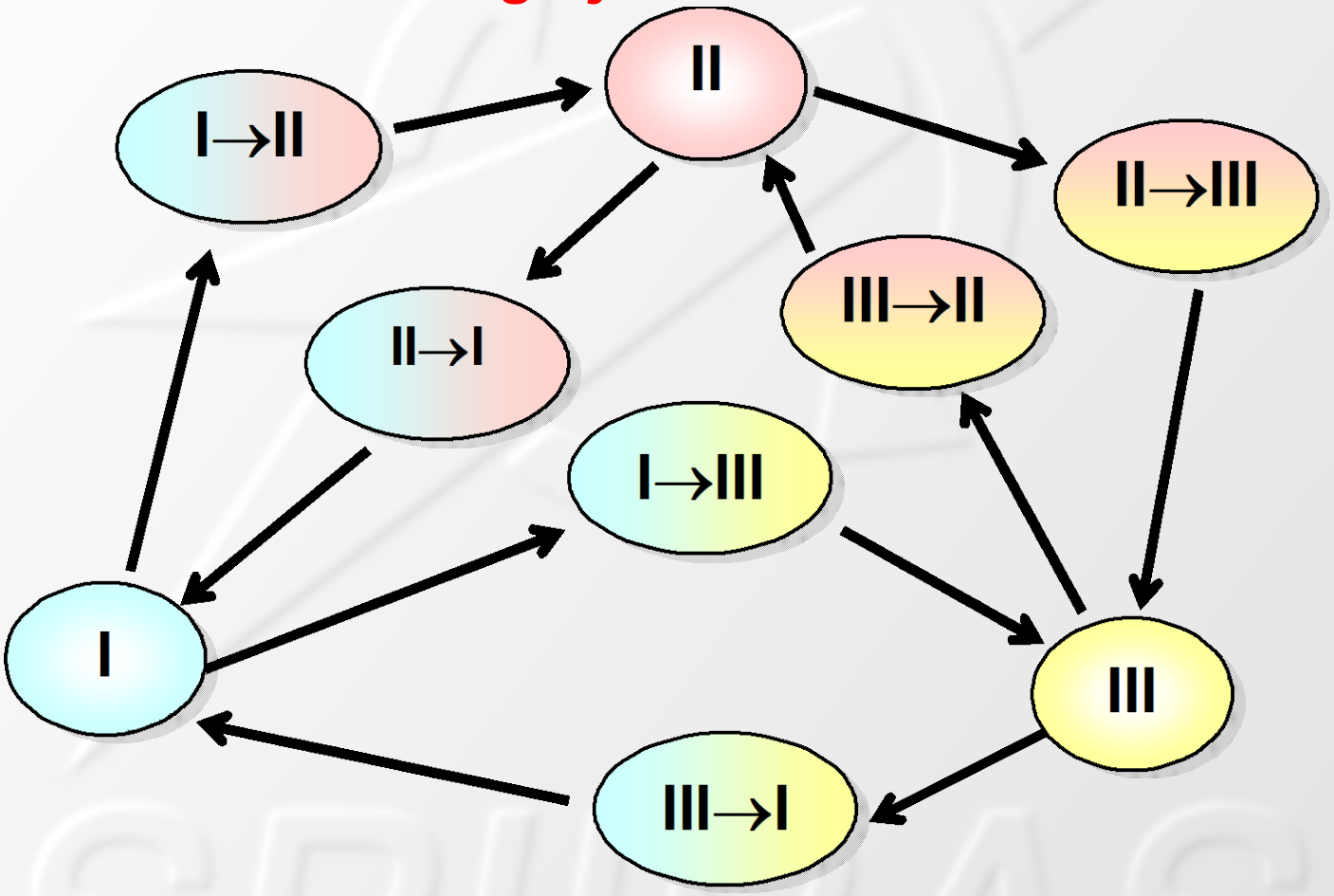
PL: satellite payload; SS: support subsystems; DKB: distributed database / knowledge base; AM: standard automation module; LDN: local data network; DIM: standardized data interface module; TT&C: telemetry, tracking and command system; WS: workstation; FDN: flight dynamics and navigation; ITM: information and telemetry; MON: monitoring and diagnostics; CMD: command generation; DDN: distributed data network.

Example of a satellite constellation control workflow



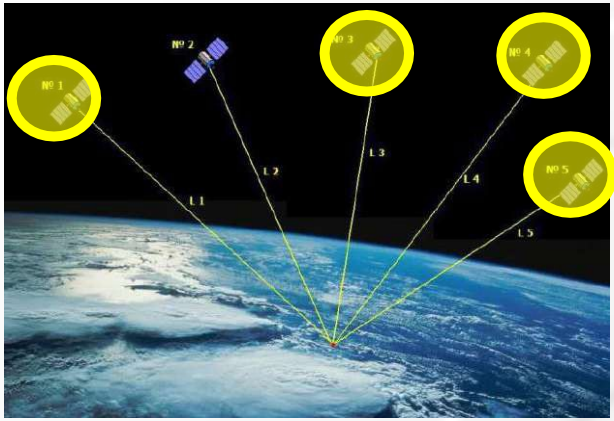
Automated control workflow for space systems

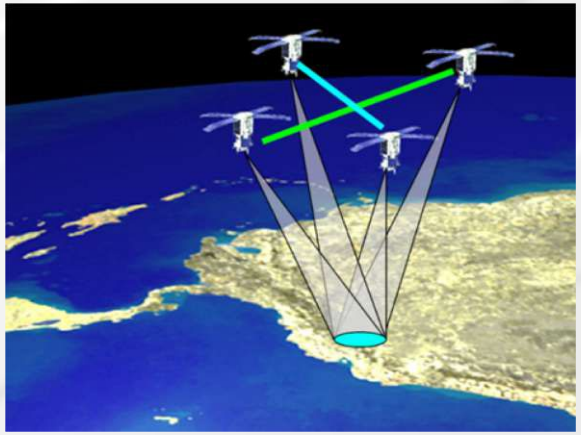
Generalized constellation control workflow for achieving system-level effects



Aggregated diagram of the constellation's multistructural macrostates

Examples of constellation mission effects (Russian Space Systems)



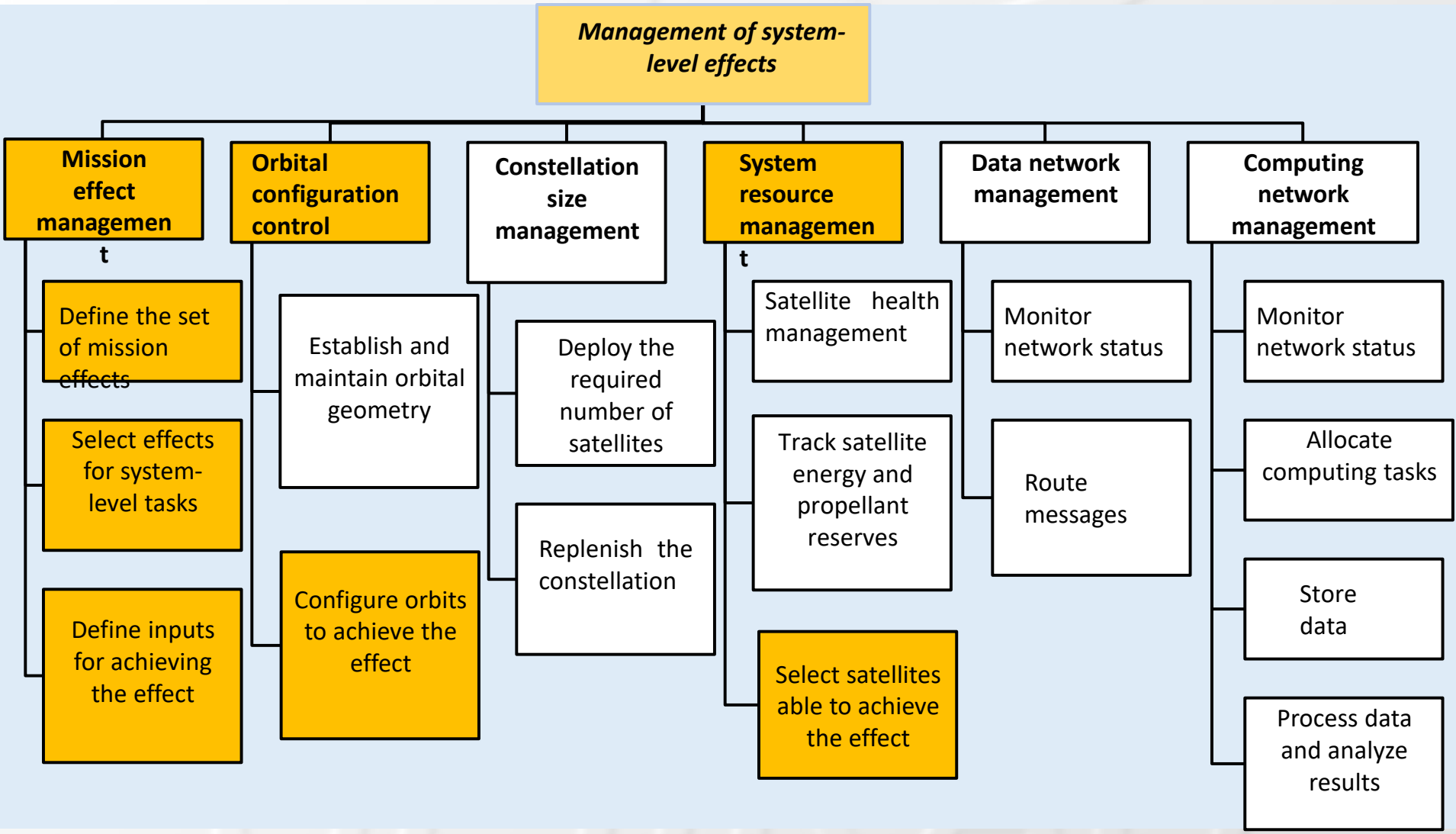




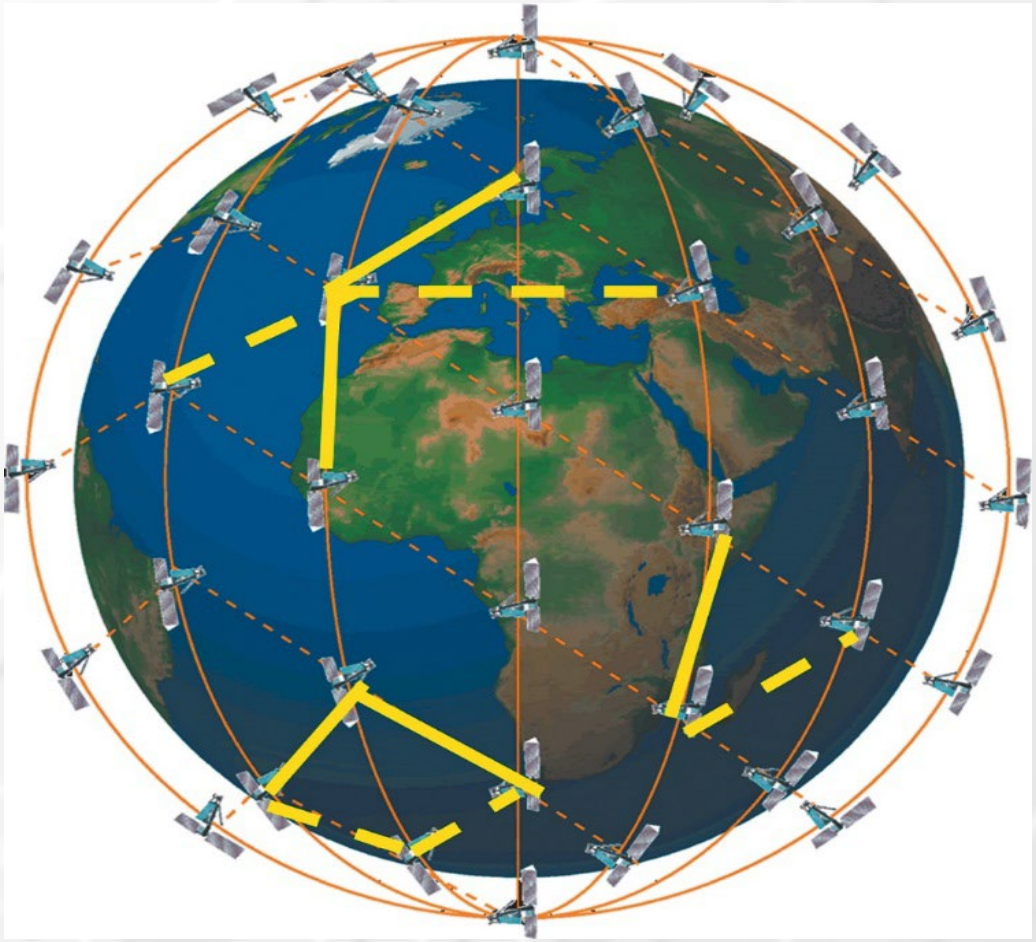
Satellite navigation requires a geometric dilution of precision that meets the navigation accuracy requirements.

Earth observation requires the target to lie within the payload's imaging swath. More demanding missions require continuous coverage, multiview or stereo imaging, and integrated observations.

Satellite communications require at least one communications satellite within the subscriber's visibility region, or overlapping coverage from multiple satellites.

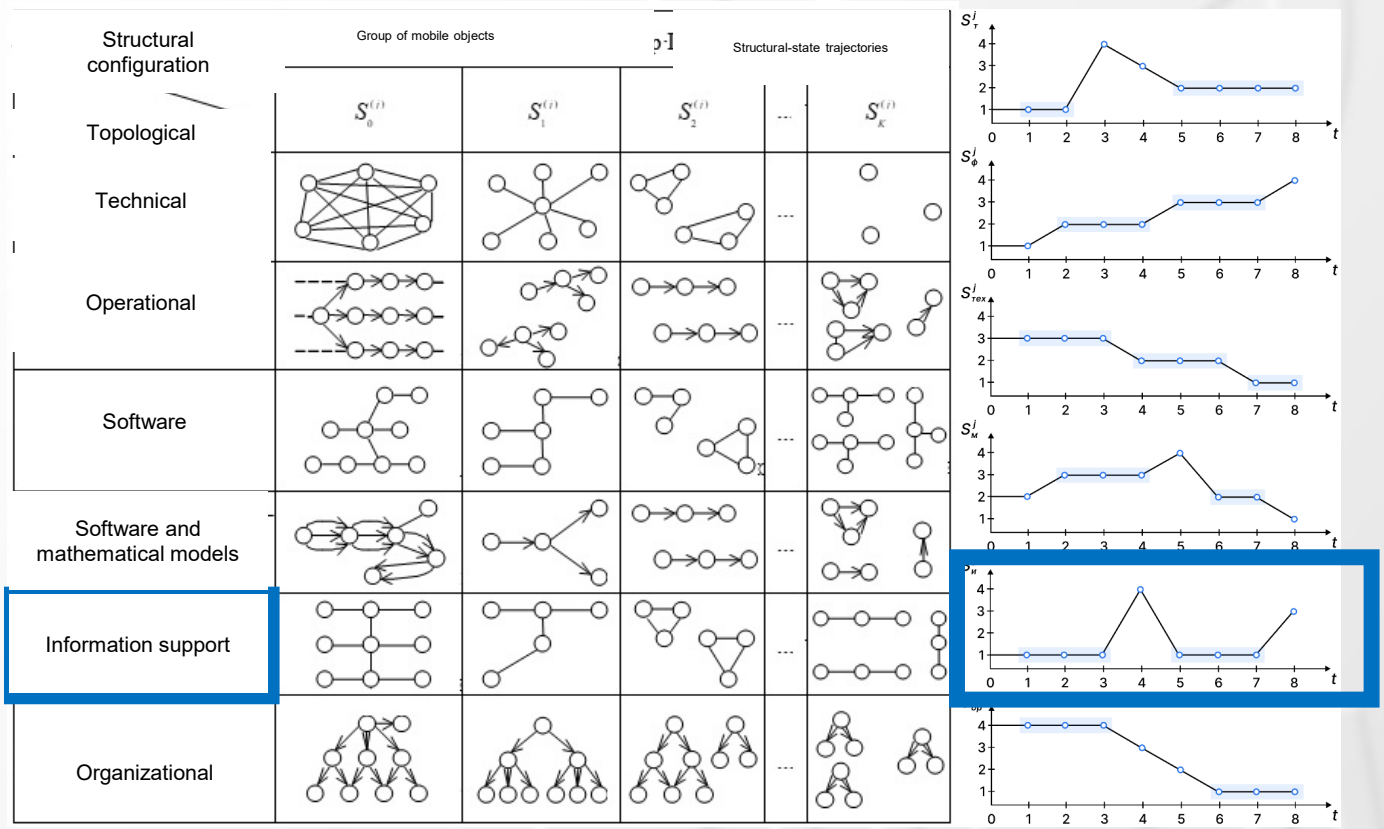

Management of system-level effects
Mission effect management
Define the set of mission effects
Select effects for system-level tasks
Define inputs for achieving the effect
Orbital configuration control
Establish and maintain orbital geometry
Configure orbits to achieve the effect
Constellation size management
Deploy the required number of satellites
Replenish the constellation
System resource management
Satellite health management
Track satellite energy and propellant reserves
Select satellites able to achieve the effect
Data network management
Monitor network status
Route messages
Computing network management
Monitor network status
Allocate computing tasks
Store data
Process data and analyze results

Dynamic constellation formation for system-level effects (Russian Space Systems)



Multistructural dynamics of a group of mobile objects: a satellite constellation

Possible changes in the structural states of a group of mobile objects



The distinctive feature of a group of mobile **objects is its structural dynamics** (highlighted in blue). Although the objects move, the structure of their information exchange, defined by radio visibility, remains unchanged over certain time intervals. These are intervals of constant interaction structure.

Space computing comprises *interconnected processes for receiving, transmitting, processing and storing data and information directly* onboard *satellites and in orbital* data centers, using intersatellite communication links. This replaces the conventional approach of downlinking raw data to users on Earth.

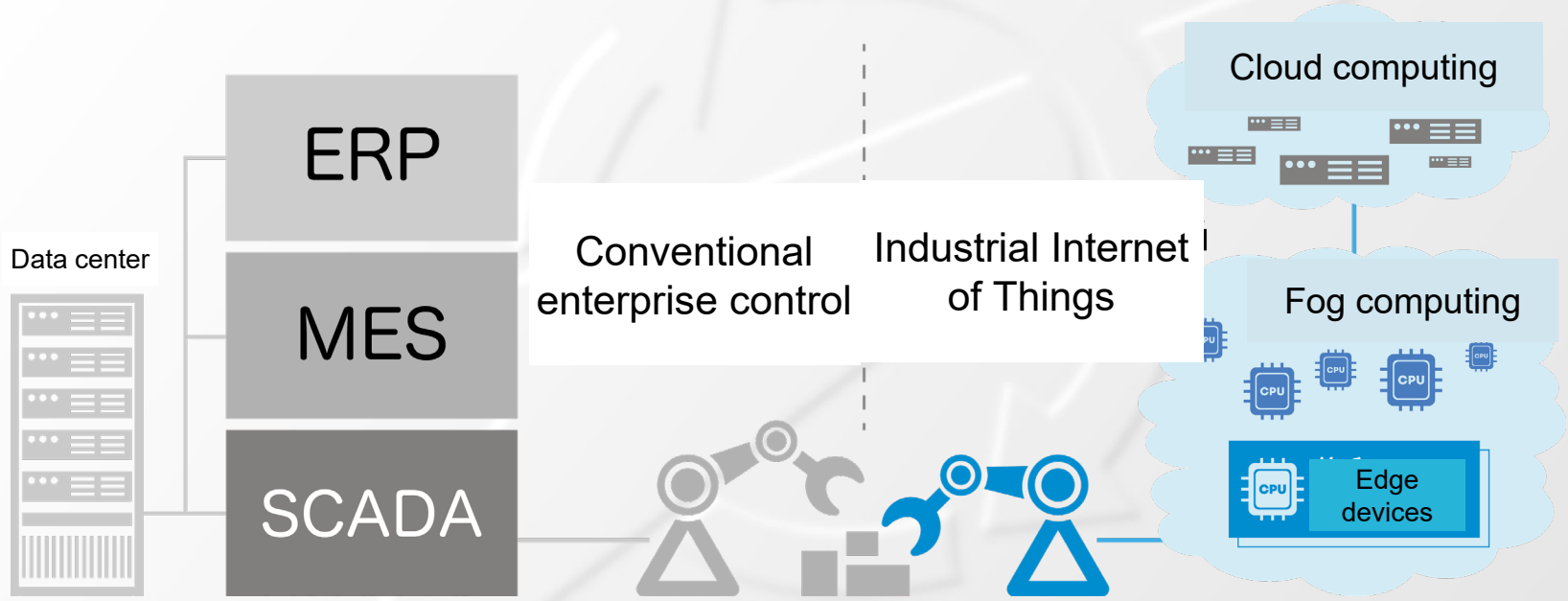
Space edge computing takes place onboard an individual satellite**. Space fog computing connects an entire** satellite constellation through intersatellite links to distribute computing tasks across the network.

Space computing offers extensive opportunities *to use solar power around the clock*, independently of terrestrial weather and without atmospheric attenuation. According to Starcloud, terrestrial solar plants achieve capacity factors of 24% in the United States and below 10% in Northern Europe, whereas the orbital figure can exceed 95%.

Research identifies a three-tier ***edge–fog–cloud*** architecture as the most promising approach to space ***computing i***n satellite constellations equipped with high-performance **o**n**bo**ard computing platforms and intersatellite links, including optical links. These capabilities support a range of orbital network configurations, such as clusters of large, medium and small satelli**te**s.

These control, computing and communications capabilities provide a basis for a space-based Industrial Internet of Things (SatIoT or space-based IIoT). Artificial intelligence enab**l**es the integration of the IIoT concept with proactive constellat**ion** control and the associated space-computing process**es.**

Industrial Internet of Things



A new level of complexity: edge and fog computing

- **Standardized nodes**
- **Multiple process configurations**
- **Potential all-to-all connectivity**
- **Highly dynamic infrastructure**

Fog and edge computing are architectures for transmitting, receiving, storing, processing and relaying data within networks of cloud services and end devices, locally and/or over the Internet.

COOPERATION BETWEEN SPIIRAS (SPC RAS) AND THE RESEARCH INSTITUTE OF SPACE SYSTEMS UNDER UNION STATE SCIENCE AND TECHNOLOGY PROGRAMS

No.	*Contracting organization*	*Contract number and date*	*Scope of work*	*Contract period*
1	A. A. Maksimov Research Institute of Space Systems	No. 7, 9 Jan 2014; No. 14, 27 Jun 2014	Research work package: methods and an experimental software suite for analyzing and predicting the reliability of onboard equipment in small, low-mass satellites throughout the life cycle ***(Monitoring-SG***).	1 Jan 2014 – 31 Oct 2017
2	A. A. Maksimov Research Institute of Space Systems	No. 06/NIR/2017, 24 Jul 2017; No. 7/910, 5 Mar 2018	Research work package: methods and dedicated software for ground and onboard functional modules to manage recovery from onboard emergencies and critical conditions ***(Technology-SG***).	24 Jul 2017 – 15 Oct 2020
	A. A. Maksimov Research Institute of Space Systems	No. I1/7.1221, 28 Jan 2021	Research work package: technology and an experimental software prototype for integrated use of data from all Earth-observation satellites in the Russian and Belarusian conste***llation (Integration-SG-3.2.4.1)***.	28 Jan 2021 – 15 Oct 2023
	A. A. Maksimov Research Institute of Space Systems		*D*evelopment of core orbital and ground components for small-satellite constellations observing Earth's surface and near-Earth space (Comple***x-SG-3.1.2.1; 3.2.3.1).***	2023–2026

2. Problem description and mathematical formulation

General problem formulation

$$S\{[f \subset F(\pi)]R[m \subset M]\} \rightarrow extr, \quad (1)$$

$$\pi \subset P, \quad (2)$$

$$f \subset F(\pi) \quad (3)$$

$$m \subset M, \quad (4)$$

P is the set of available control principles and algorithms π ⊂ P used to design the system or its components. F is the set of interrelated functions (tasks and operations) performed by the system. Each choice of π defines a function set F(π). System design selects a subset f ⊂ F(π) sufficient to implement the chosen principles. M is the set of possible interconnected components of the complex-system control architecture.

Fundamental challenges in constellation control using space computing

The central challenge in constellation control using space computing is the following interdependence:

- *Optimal control programs for constellation and ground-control components can be determined only after the information-processing and control functions and algorithms assigned to those components are known.*
- *Conversely, the allocation of functions and algorithms depends on the structure and parameters of the control laws governing these components.*
- *This interdependence becomes more difficult to resolve because the composition and structure of both the constellation and the ground control segment change over time.*

Methodology for proactive control of complex systems

Current research on structural dynamics control addresses three main areas:

- *Design of the technical architecture of a complex system, given the operating laws of its principal components and subsystems*
- *Design of the functional architecture, including control programs for the principal components and subsystems, given the technical architecture*
- *Joint structural and functional design across the system life cycle. This may involve simultaneous design of topology, hardware and operational architectures, organizational structures, software and mathematical models, and information support.*

United States. The United States leads both theoretical research and in-orbit demonstration of space edge computing, supported by DARPA, the Space Development Agency (SDA), NASA, the US Space Force and private companies including SpaceX, Microsoft, Planet Labs, Amazon and Loft Orbital. Platforms include space-grade and radiation-tolerant Xilinx/AMD Versal AI Core devices (XQRACAP), NVIDIA Jetson AGX Orin Industrial systems in thermally controlled and shielded small-satellite compartments, Intel Loihi neuromorphic chips in AFRL experiments on ultralow-power recognition, and dedicated vision processing units.

Modeling and algorithms include joint sensor–compute–link scheduling formulated as mixed-integer nonlinear programming with Pareto multiobjective optimization, and decentralized task allocation. Multi-agent reinforcement learning uses MAPPO (Multi-Agent Proximal Policy Optimization) and MADDPG (Multi-Agent Deep Deterministic Policy Gradient) to adapt satellite attitude and computing queues to stochastic events, such as a sudden break in cloud cover over a target or detection of a rocket-launch plume.

China. The strategic emphasis is on scale and collaborative machine learning. The Tiansuan constellation tests an orbital edge-learning concept. Space Federated Edge Learning (Space-FEL) enables satellites to share experience in recognizing ground objects under different weather conditions, exchange deep-network weights over intersatellite links and refine models without downlinking gigabytes of raw imagery. Methods include dynamic-network models based on time-expanded graphs (TEGs) and periodic time-varying graphs (TVGs), collaborative edge learning, and onboard neuromorphic computing. Spiking neural networks (SNNs) support proactive change detection in SAR and optical sensor data.

United Kingdom and European Union. Research emphasizes verifiable reliability and standardization of autonomous systems, primarily on small-satellite platforms such as Φ-sat-1/2 and OPS-SAT. A key contribution is rigorous Contact Graph Routing (CGR) models that account for stochastic radio links and intermittent connectivity under the severe energy constraints of CubeSat and SmallSat platforms.

Russian Federation. Research groups at FRC CSC RAS, SRISA RAS, ICS RAS, ISI RAS, RFNC–VNIIEF, SPC RAS, MSU, SPbU, LETI, SUAI, Voenmekh, MAI, Bauman MSTU, the Mozhaisky Military Space Academy, SPbPU, TSTU and defense-industry organizations are leaders in dynamic multiobjective structural and functional design and development control of complex technical systems. Russian polyhedral optimization and dynamic-graph models provide detailed treatment of system interdependencies. The transition from theory to in-orbit implementation is nevertheless constrained by *the available electronic components.*

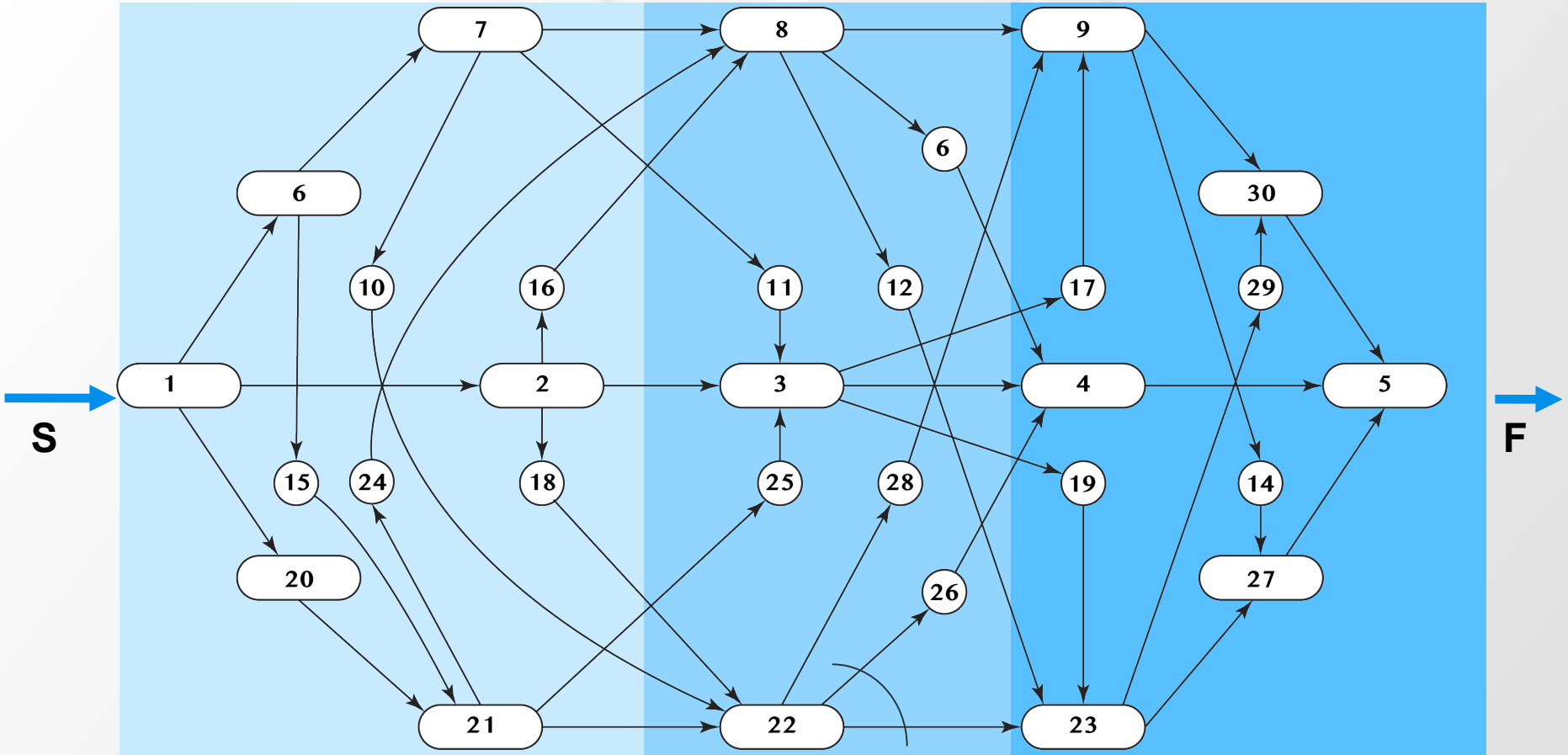
This has motivated lightweight, quasi-analytic*al projection-operator algorithms and integer heuristics suitable for processors of moderate performance.* ***The federal Sphere project*** **e*nvisages deployment o***f small-satellite constellations, with requirements for integration into the national Luch relay system.

Bureau 1440 is a rapidly developing private Russian initiative. The Rassvet-1 and Rassvet-2 missions in 2023–2024 demonstrated Russia's first successful data transfer over domestically developed optical intersatellite links (OISLs) across hundreds of kilometers and tested 5G NTN subscriber communications. These capabilities establish infrastructure for a future distributed orbital cloud.

.

Alternative workflows for managing space-computing information processes

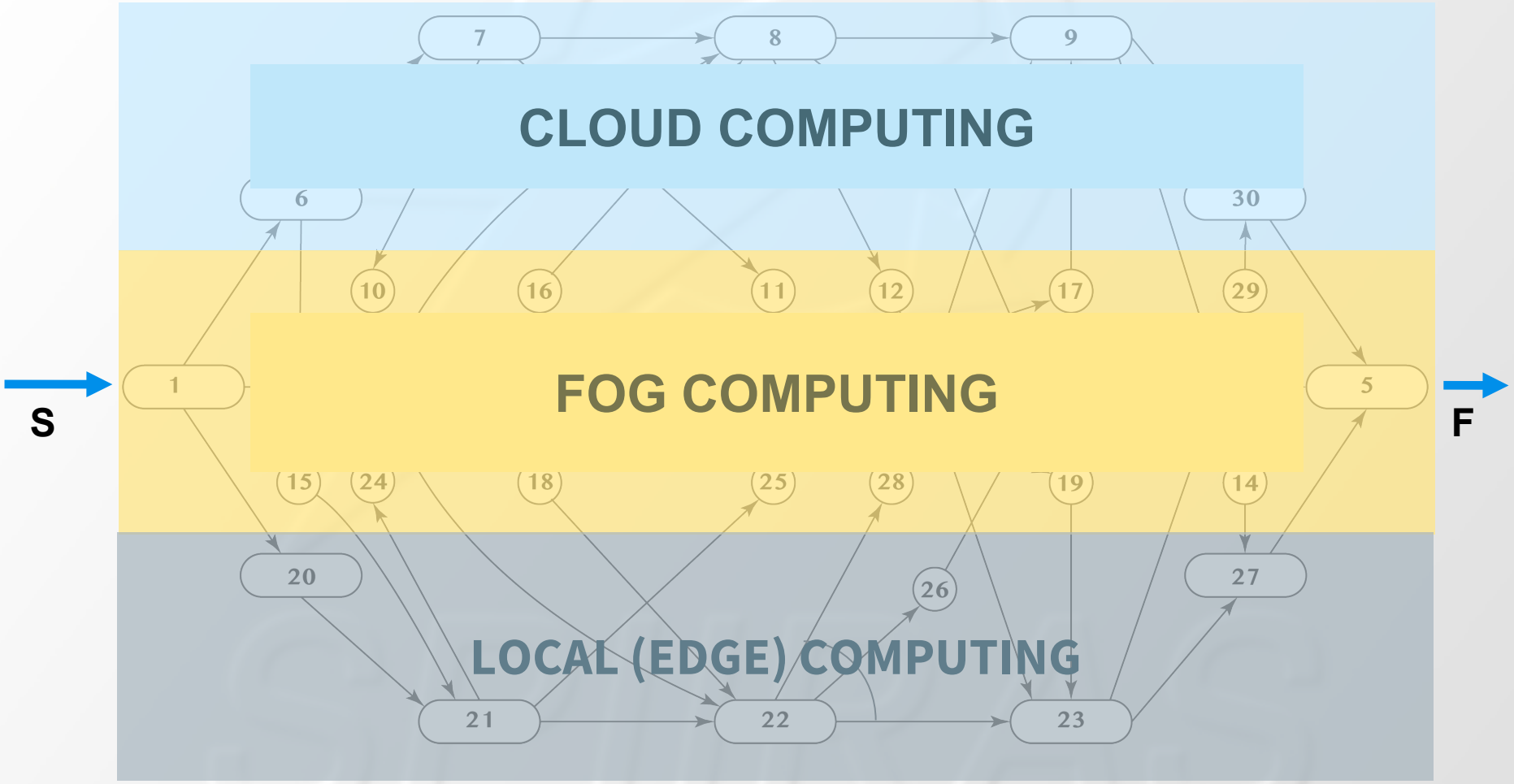
Alternative graph of information-processing and control-command workflows



24

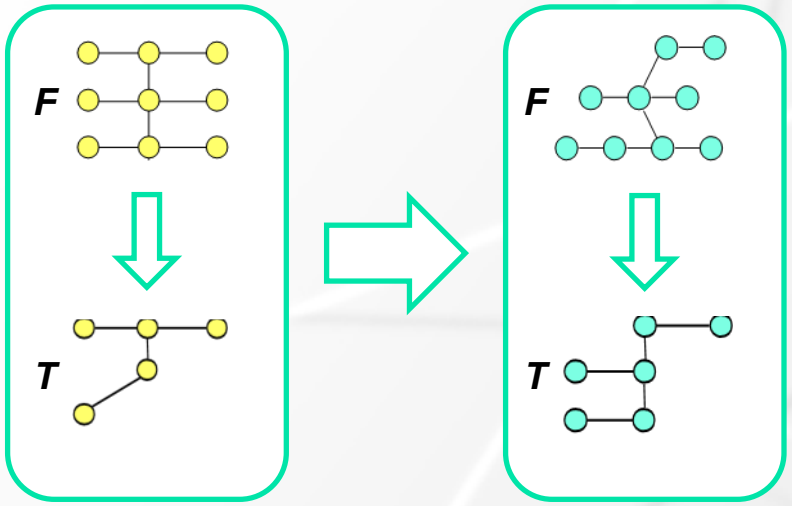
Alternative workflows for managing space-computing information processes

Alternative graph of space-computing control workflows



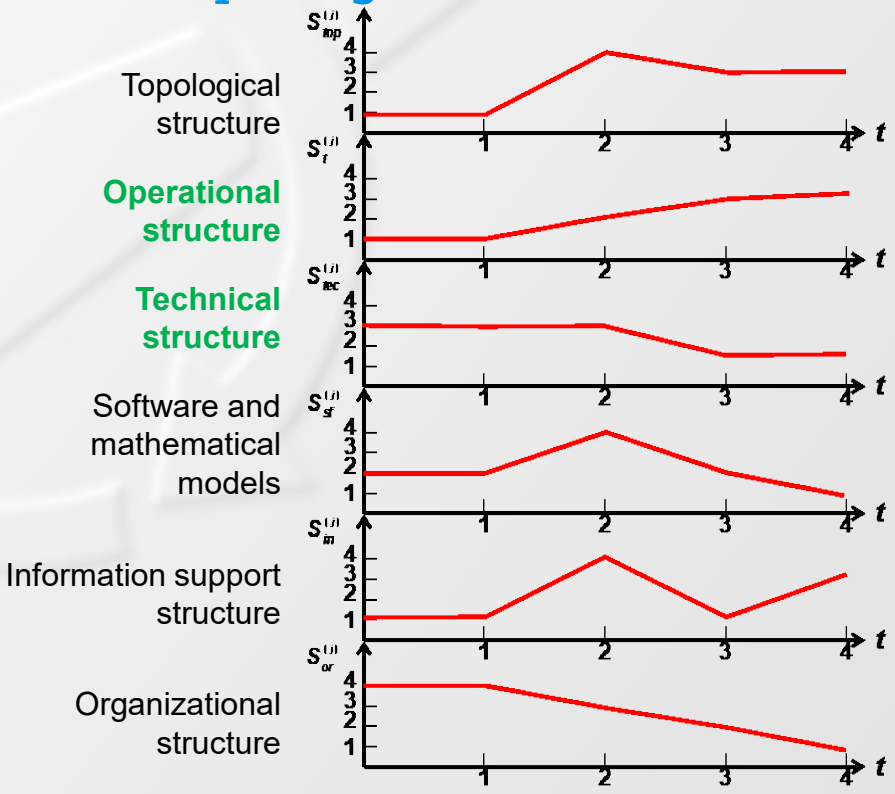
25

Graphical interpretation of architecture and control-program synthesis for space computing



Multistructural macrostate at time t_1

Multistructural macrostate at time t2

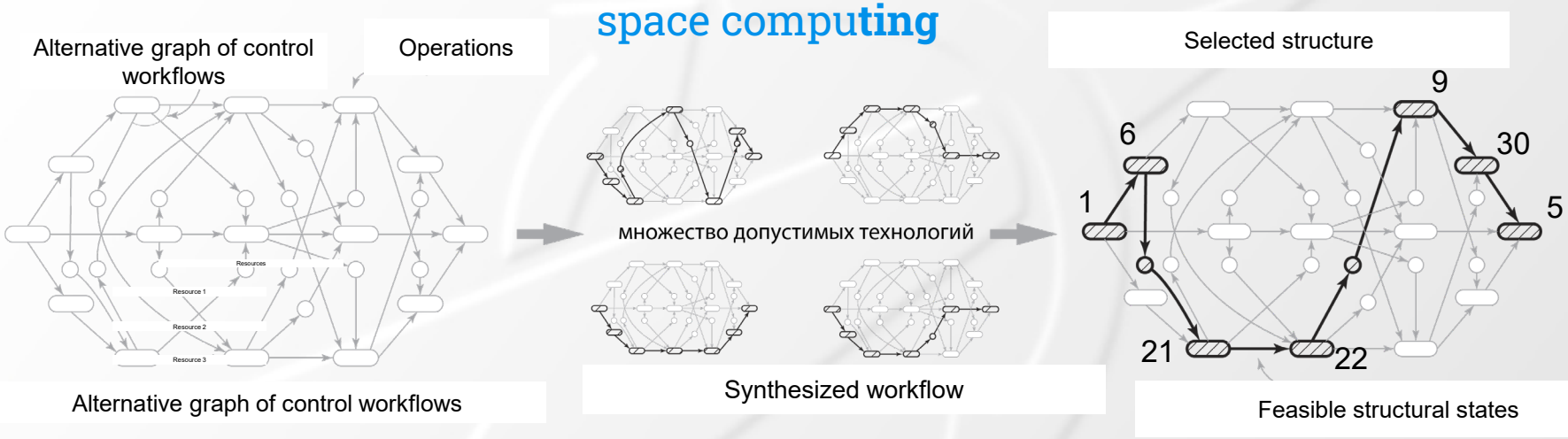


Graphical representation of controlled structural dynamics in space computing

***F: fu*nctional architecture; T: technic*al ar*chitecture of space computing.**

Dynamic alternative multigraphs, their mappings at each instant and their evolution between successive instants describe the controlled structural dynamics of the information processes.

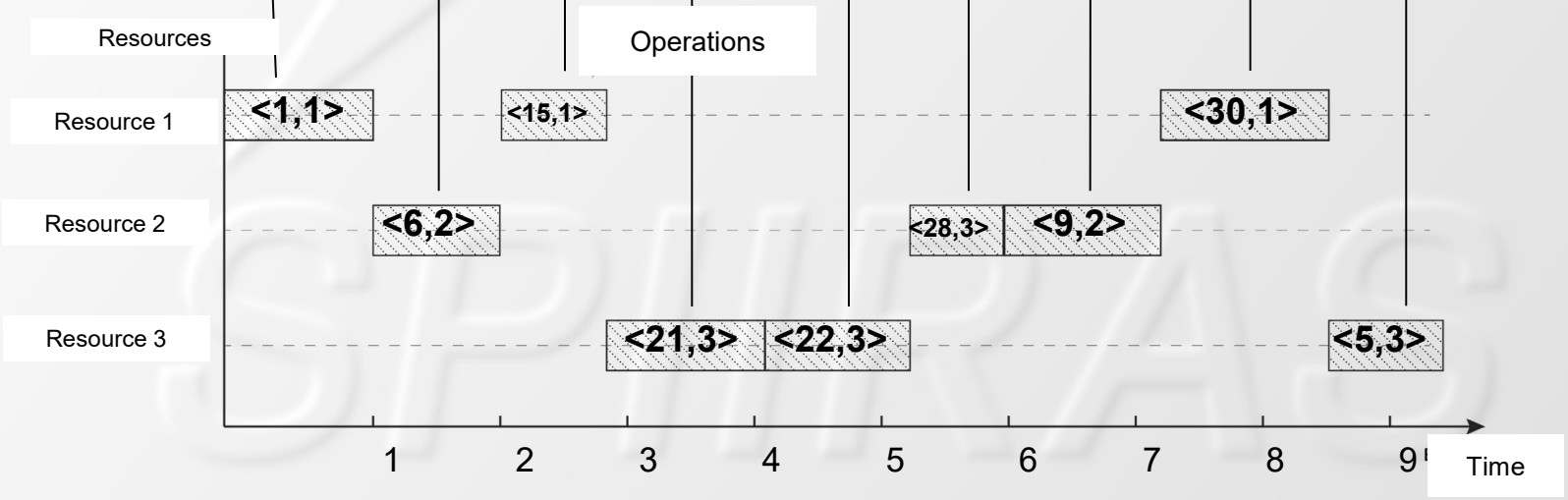
Graphical interpretation of architecture and control-program synthesis for space computing



Synthesized space-computing workflow



Synthesized space-computing control plan and scheduling



PROACTIVE CONTROL OF SPACE COMPUTING: PROBLEM FORMULATION

Develop principles, approaches, models, methods and algorithms for determining proactive control programs ⟨U^t, S*δ⟩ for system operation and evolution, subject to the following conditions:

$$J_\theta\left(X_\chi^t, \Gamma_\chi^t, Z_\chi^t, F_{<\chi,\chi'>}^t, \Pi_{<\tilde{\delta},\tilde{\tilde{\delta}}>}^t, t \in (t_0, t_f]\right) \to \underset{<U^t, S_\delta^{*t_f}> \in \Delta_g}{extr},$$

$$\Delta_g = \left\{ U^t, S_\delta^{t_f} > R_\beta\left(X_\chi^t, \Gamma_\chi^t, Z_\chi^t, F_{<\chi,\chi'>}^t, \Pi_{<\tilde{\delta},\tilde{\tilde{\delta}}>}^t\right) \le \tilde{R}_g; U^t = \Pi_{<\delta_1,\delta_2>}^{t_1} \quad \Pi_{<\delta_2,\delta_3>}^{t_2} \quad \Pi_{<\tilde{\delta},\delta>}^{t_2}; \beta \in \mathbf{B} \right\} (1)$$

Jθ: criteria functions describing the quality and performance of the system's principal components and subsystems.
U^t: control actions that determine both the system architecture and its operating processes at different life-cycle stages.
q ∈ Q = {1, …, l}: criterion indices.
Δg: dynamic alternatives, comprising system structures, parameters and operating programs.
R̃g: specified values.
B: indices of spatial, temporal, technical and process constraints on development and operational control programs.
T = (t_0, tf]: the interval for computation, multiobjective assessment and analysis of system operation and evolution, and for determining control programs and laws.

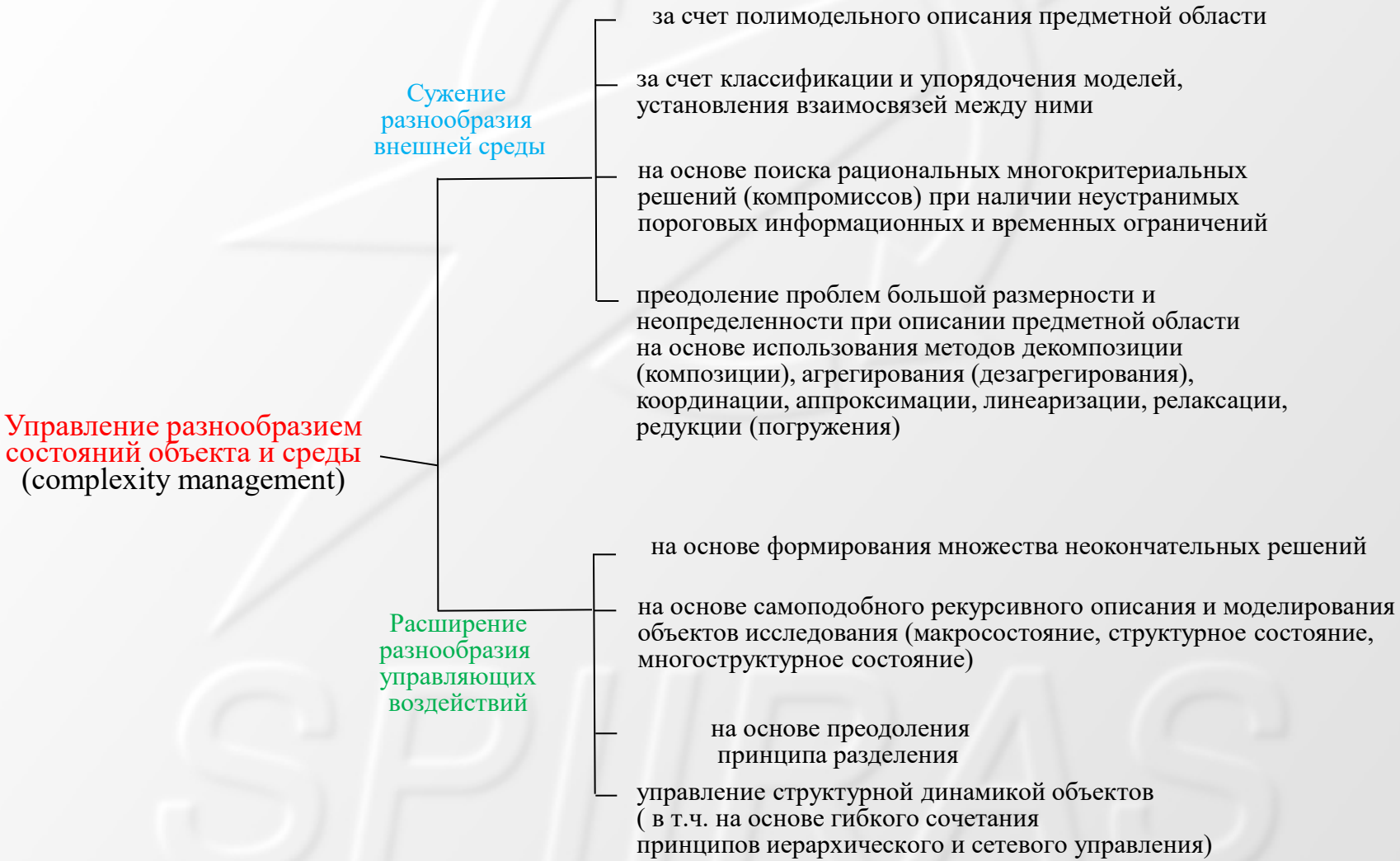
Fundamental challenges in constellation control using space computing

- High dimensionality and nonlinearity of models describing the architecture and operating modes of constellation and ground-control components and subsystems
- Explicit representation of uncertainty arising from environmental effects on the constellation and ground control segment
- Multi-objective optimization of structural dynamics control programs using integrated multi-model frameworks

SPIRAS

2. Methodological foundations and solution methods

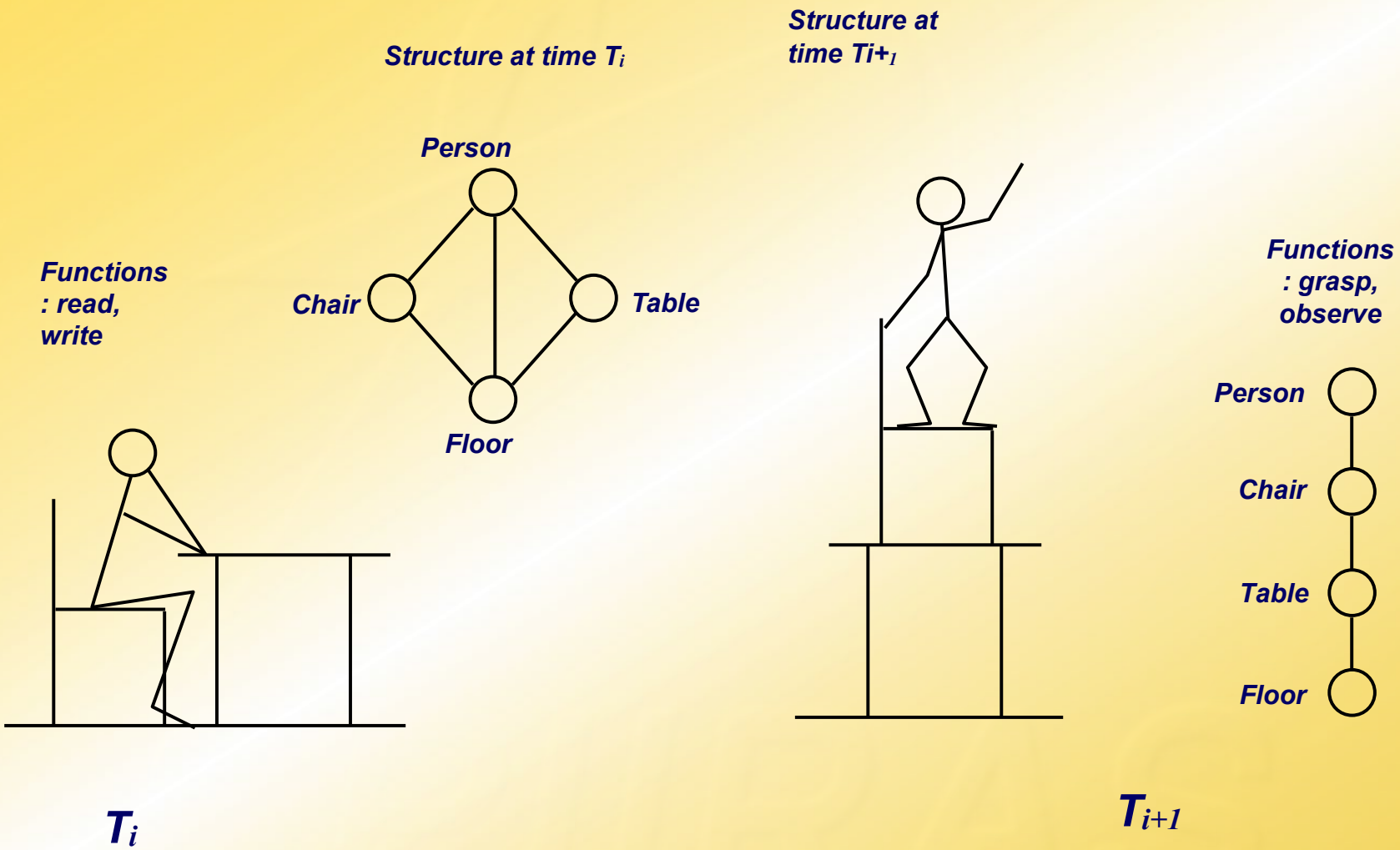
Концепция проактивного (упреждающего) управления структурным разнообразием МГ КА



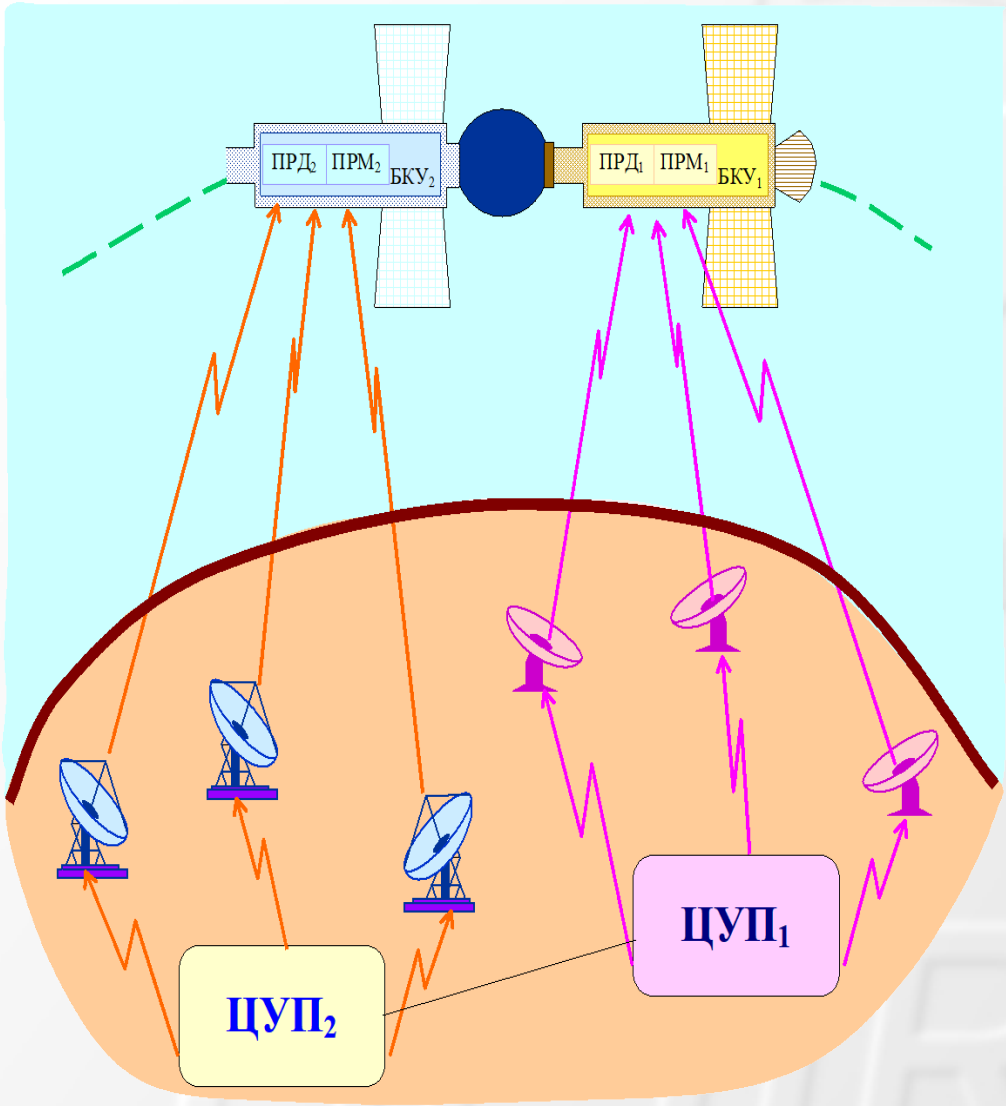
Approaches to managing variety

- *Change operating modes and objectives, task content and execution sequences to suit prevailing conditions*
- *Reposition individual system components and subsystems*
- *Redistribute and decentralize functions, tasks, control algorithms and information flows across system levels*
- *Manage reserve capacity*
- *Use flexible and streamlined control workflows*
- *Reconfigure system structures as capabilities degrade*

Example of structural dynamics control in a complex system



Пример управления реконфигурацией структур СлО при ее деградации



1- ПРД ТК

2 – ПРМ ТК

3 – ТК “Прогресс”

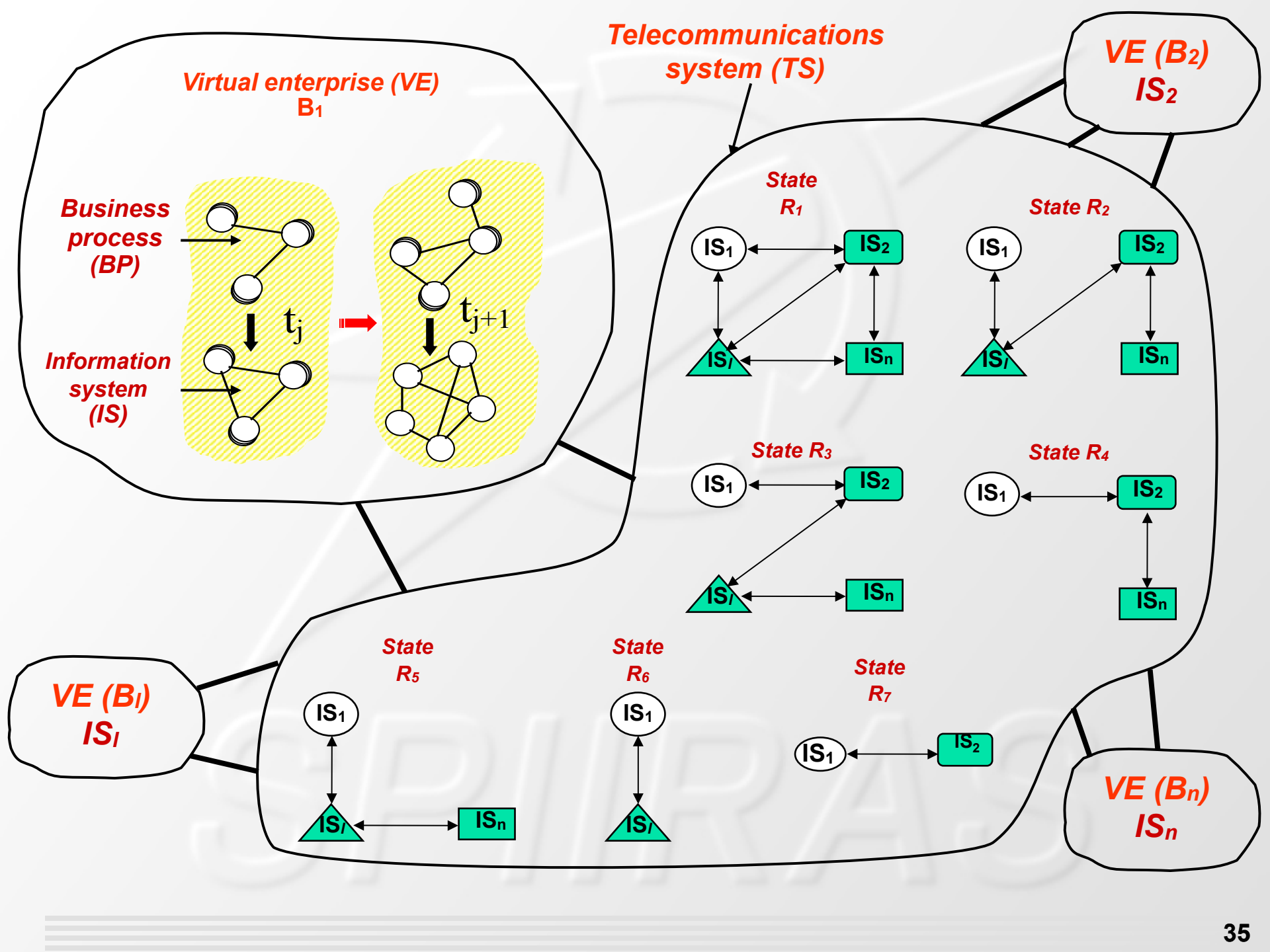
4 – ПРД ОРС

5 – ПРМ ОРС

6 – ОРС “Мир”

ЦУП–центр управления ТК

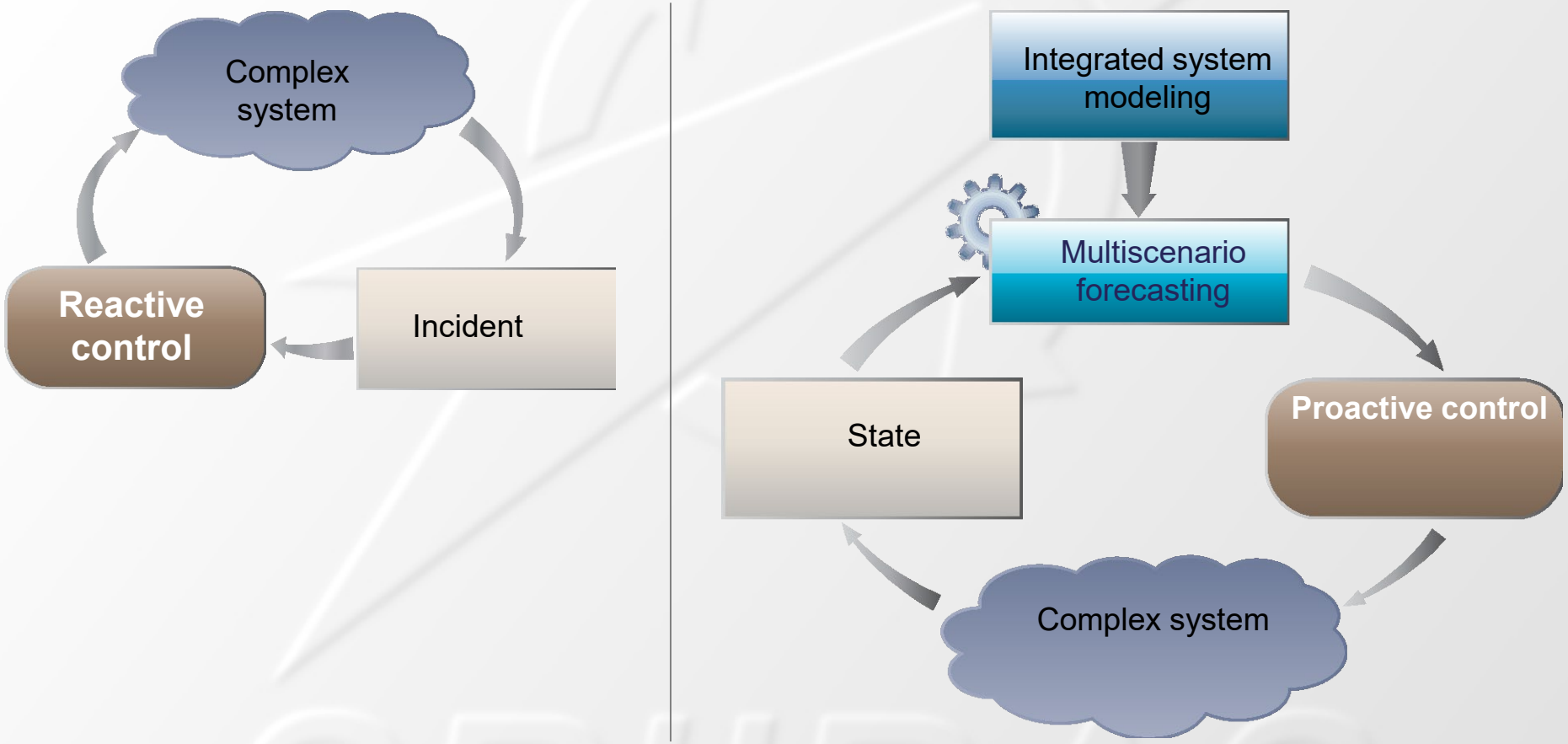
ЦУП – центр управления ОРС


Telecommunications system (TS)
Virtual enterprise (VE)
B1
Business process (BP)
Information system (IS)
tj
tj+1
VE (B2)
IS2
VE (Bl)
ISl
VE (Bn)
ISn
State R1
State R2
State R3
State R4
State R5
State R6
State R7
IS1
IS2
ISl
ISn

Методология проактивного управления сложными объектами

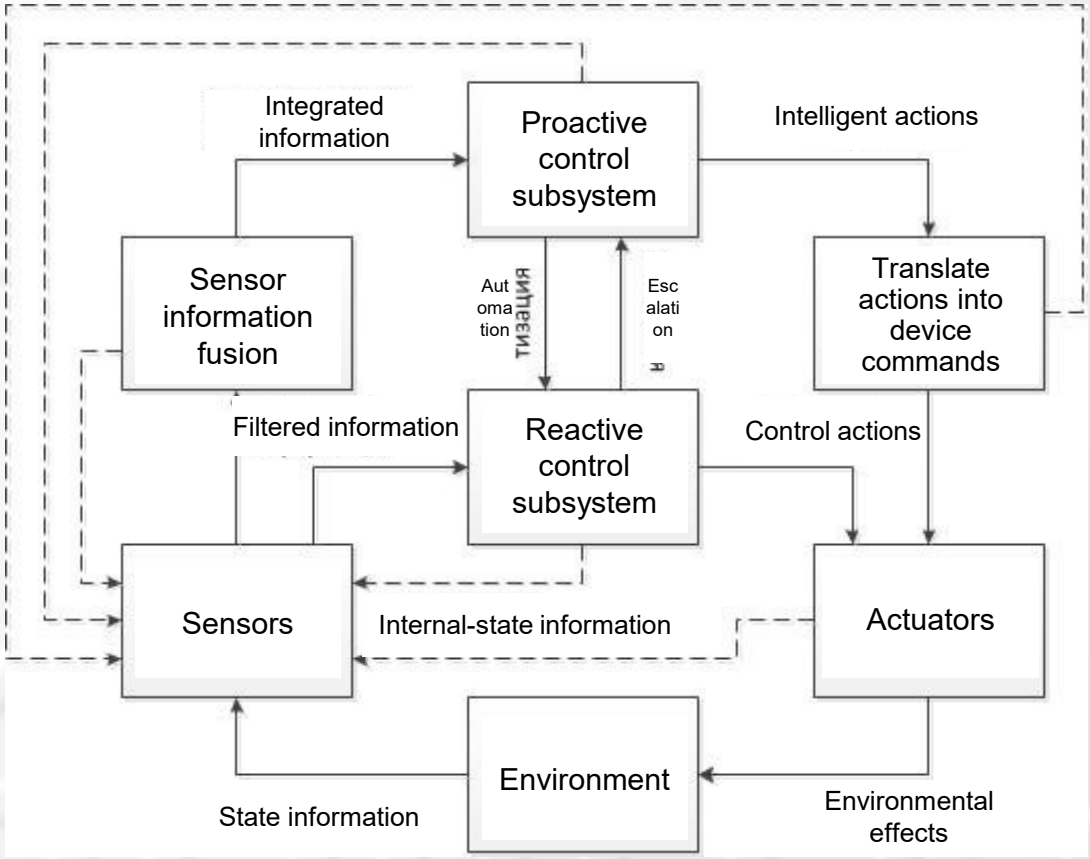
*Проактивное управление СлО (в том числе и СлО), в отличие от традиционно используемого на практике **реактивного управления** СлО, ориентированного на оперативное реагирование и последующее недопущение инцидентов, предполагает предотвращение возникновения инцидентов за счет создания в соответствующей системе мониторинга и управления принципиально новых прогнозирующих и упреждающих возможностей (системно-функциональной избыточности) при формировании и реализации управляющих воздействий, базирующихся на концепции системного (комплексного) моделирования.*

Methodology for proactive control of complex systems



Proactive control prevents incidents by introducing predictive and anticipatory capabilities into monitoring and control. This system-level functional redundancy supports the formulation and execution of control actions based on integrated system modeling.

The role of reactive and proactive control in complex-system survivability



Methodology for proactive control of complex systems

Integrated system modeling of complex systems, whether *natural or engineered, physical or virtual, comprises methods and technologies for representing a system through multiple models. It combines methods, algorithms and procedures for multi-objective analysis, synthesis and selection of preferred management decisions concerning the system's creation, operation and development under changing internal and external conditions.*

39

Core principles of proactive control

- *Niels Bohr's principle of complementarity*
- *The law of requisite variety: W. Ross Ashby and Stafford Beer*
- *Dennis Gabor's principle of provisional decisions*
- *The principle of minimum necessary anticipation*
- *P. K. Anokhin's principle of anticipatory reflection*
- *The principle of parametric and structural adaptation: L. A. Rastrigin and V. I. Skurikhin*

40

Прикладная теория проактивного интеллектуального управления структурной динамикой МГ КА

Основные особенности построения современных АСУ АПО с перестраиваемой структурой

- *многоцелевой характер функционирования современных АПО;*
- *мобильность основных элементов и подсистем АСУ АПО;*
- *избыточность основных элементов и подсистем АСУ АПО и связей между ними;*
- *структурное подобие элементов и подсистем АСУ АПО, находящихся на различных уровнях системы управления;*
- *многовариантность реализации функций управления на каждом из уровней АСУ АПО, использование гибких технологий управления;*
- *наличие унифицированных технических средств АСУ, объединённых в типовые вычислительные модули, КСА;*
- *наличие пространственно распределённой многоконтурной интегральной сети обмена данными*

Рассматриваемое научное направление

УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ ДИНАМИКОЙ АСУ АПО В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

на этапе создания АСУ АПО	на этапе применения АСУ АПО	на этапе развития АСУ АПО

на этапе перспективного планирования	на этапе долгосрочного и оперативного планирования	на этапе оперативного управления

Решаемая проблема

РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ КОМПЛЕКСНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ И УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРАМИ АСУ АПО

***концепции**: системного анализа и моделирования, современной теории проактивного интеллектуального управления сложными динамическими системами с перестраиваемой структурой*

***принципы**: программно-целевого управления системного моделирования, внешнего дополнения, необходимого разнообразия, погружения*
***подходы**: интегративный, категорийно-функторный, структурно-*

***требования**: системного подхода к организации процессов управления, адекватности, универсальности и проблемной ориентации, гибкости (адаптивности), унификации; простоты и доступности*

Возможные варианты управления структурами АСУ АПО

- *изменение способов и целей функционирования АСУ АПО, их содержания, последовательности выполнения в различных условиях обстановки;*
- *перераспределение функций, задач и алгоритмов управления между уровнями АСУ АПО;*
- *управление резервами АСУ АПО;*
- *реконфигурация структур АСУ АПО;*
- *перемещение в пространстве отдельных элементов и подсистем АСУ АПО*

Исходные данные

- *состав, структура АСУ АПО, множество вариантов взаимосвязей основных её элементов, подсистем структур;*
- *пространственно-временные, технические и технологические ограничения, связанные с функционированием АСУ АПО;*
- *множество способов и методов управления основными элементами, подсистемами и структурами АСУ АПО;*
- *интервал планирования (программного управления)*

Классы решаемых задач комплексного планирования операций и управления структурами АСУ АПО

***Задачи класса А (формулировка)**. Для заданных исходных данных найти совместные оптимальные планы целевого применения АПО, варианты программного управления структурами АСУ АПО и режимами её функционирования*

***Задачи класса Б (формулировка)**. Для заданных планов целевого применения АПО, заданных ИД найти такие варианты программного управления структурами АСУ АПО и режимами её функционирования, при которых создаются наилучшие условия выполнения целевых задач АПО*

***Задачи вспомогательного класса С (формулировка)**. Для заданных исходных данных провести:*

- *оценку показателей целевых и информационно-технологических возможностей АСУ АПО;*
- *оценку структурной управляемости, устойчивости АСУ АПО;*
- *точное и приближённое агрегирование структур АСУ АПО;*
- *анализ вариантов деградации и реконфигурации структур АСУ АПО, выявить наиболее существенные факторы, влияющие на результаты целевого применения АСУ АПО*

Исходные данные

- *возможные варианты воздействия внешней среды на АСУ АПО;*
- *цели и задачи, стоящие перед АСУ АПО на заданном интервале времени;*
- *показатели и критерии оценки качества планирования и управления основными элементами и подсистемами АСУ АПО*

Прикладная теория проактивного интеллектуального управления структурной динамикой МГ КА

Задачи класса А | Задачи класса Б | Задачи класса С

РАЗРАБОТАННЫЕ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

- *Методы построения областей достижимости для АСУ АПО*
- *Методы декомпозиции и агрегирования структур АСУ АПО*
- *Методы анализа и поиска решений дифференциальных игр с непротивоположными интересами, описывающими динамику структур АСУ АПО*
- *Комбинированные методы решения задач оптимального программного управления многоуровневыми сетевыми динамическими систе-*
- *Комбинированные методы анализа и решения задач оптимального программного управления АСУ АПО в условиях неопределённости*
- *Методы структурной и параметрической адаптации моделей и алгоритмов программного управления операциями и структурами АСУ АПО*

РАЗРАБОТАННЫЕ МОДЕЛИ КОМПЛЕКСНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ И УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРАМИ АСУ АПО

- *Обобщённая математическая модель программного управления АСУ АПО, построенная на основе альтернативного системного графа с перестраиваемой структурой*
- *Категорийно-функторное и структурно-математическое описание многомодельного комплекса для решения задач управления АПО, СО*
- *Комплекс моделей программного управления:*
  - *целевыми и технологическими операциями в АСУ АПО;*
  - *вещественными, энергетическими, информационными потоками;*
  - *ресурсами АСУ АПО;*
  - *динамикой группового подведения элементов и подсистем АСУ АПО*
- *Имитационные модели реализации программ управления операциями и структурами АСУ АПО в различных условиях обстановки*

Задачи класса С | Задачи класса Б | Задачи класса А

ОСНОВНЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

- *Выбранные варианты способов и методов управления АСУ АПО, соответствующие поставленным ВЗУ целевым задачам и позволяющие наилучшим образом выполнить комплекс операций взаимодействия с ОБО на интервале планирования.*
- *Классы эквивалентных структурных состояний АСУ АПО, упорядоченные по уровням значений показателей информационно-технологических и целевых возможностей.*
- *Для каждого из указанных классов определены: планы взаимодействий АПО с ОБО и режимы их функционирования; планы взаимодействия АПО с СО, режимы их функционирования; планы взаимодействия АПО с АПО (систем АПО) и режимы их функционирования; планы взаимодействия и перемещения основных элементов и подсистем СО, режимы их функционирования*
- *Количественные многокритериальные оценки планов целевого применения АПО, варианты программного управле-*

Основные научные результаты

- *методологические основы комплексного планирования операций и управления структурами АСУ АПО;*
- *модели и методы комплексного планирования операций и управления структурами АСУ АПО;*
- *принципы, методы формального описания многоуровневых сетевых дифференциальных динамических систем с перестраиваемой структурой*

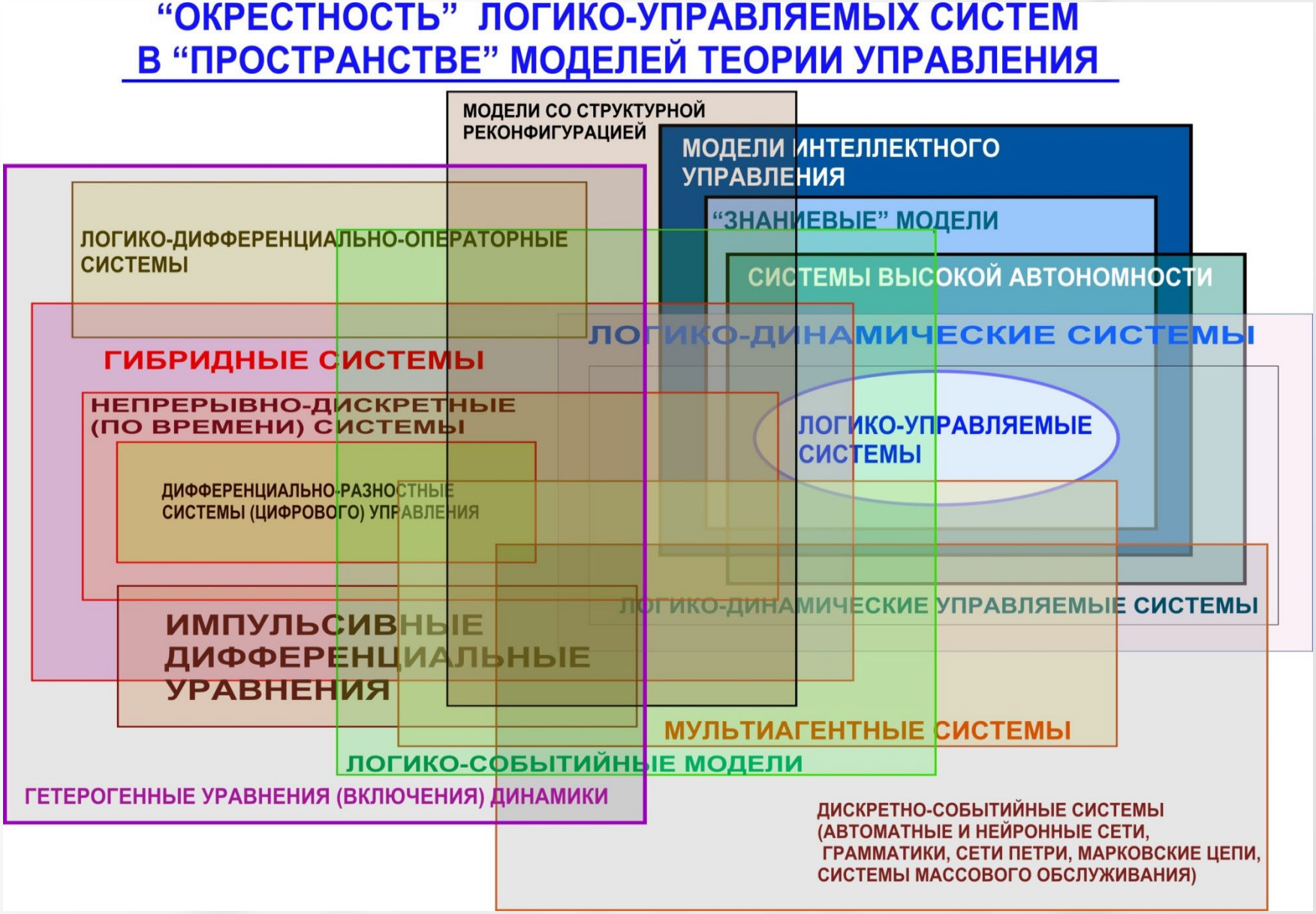
Основные научные результаты

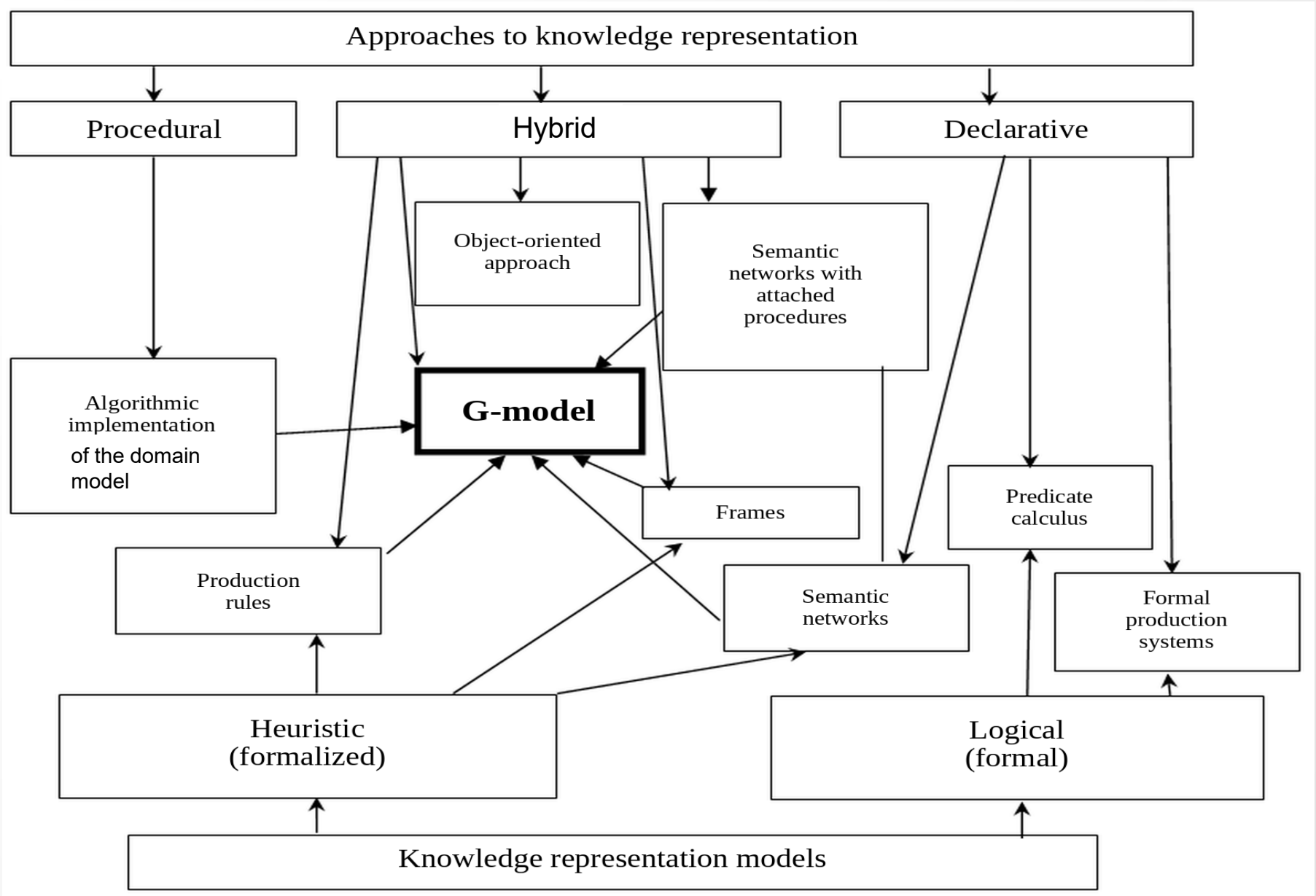
- *методы системного моделирования процессов автоматизированного управления АПО и их использование при комплексном планировании операций и управления структурами АСУ АПО;*
- *методики организации комплексного планирования операций и управления структурами АСУ АПО*

ПРЕДПОЛАГАЕМЫЙ ЭФФЕКТ ОТ ВНЕДРЕНИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

- *повышение пропускной способности АСУ АПО; уменьшение возможности возникновения пиковых нагрузок в АСУ АПО;*
- *снижение инерционности АСУ АПО, повышение оперативности применения средств СО в различных условиях;*
- *оптимальное распределение ограниченных ресурсов АСУ АПО при деградации её структуры;*

Possible ways of variety control

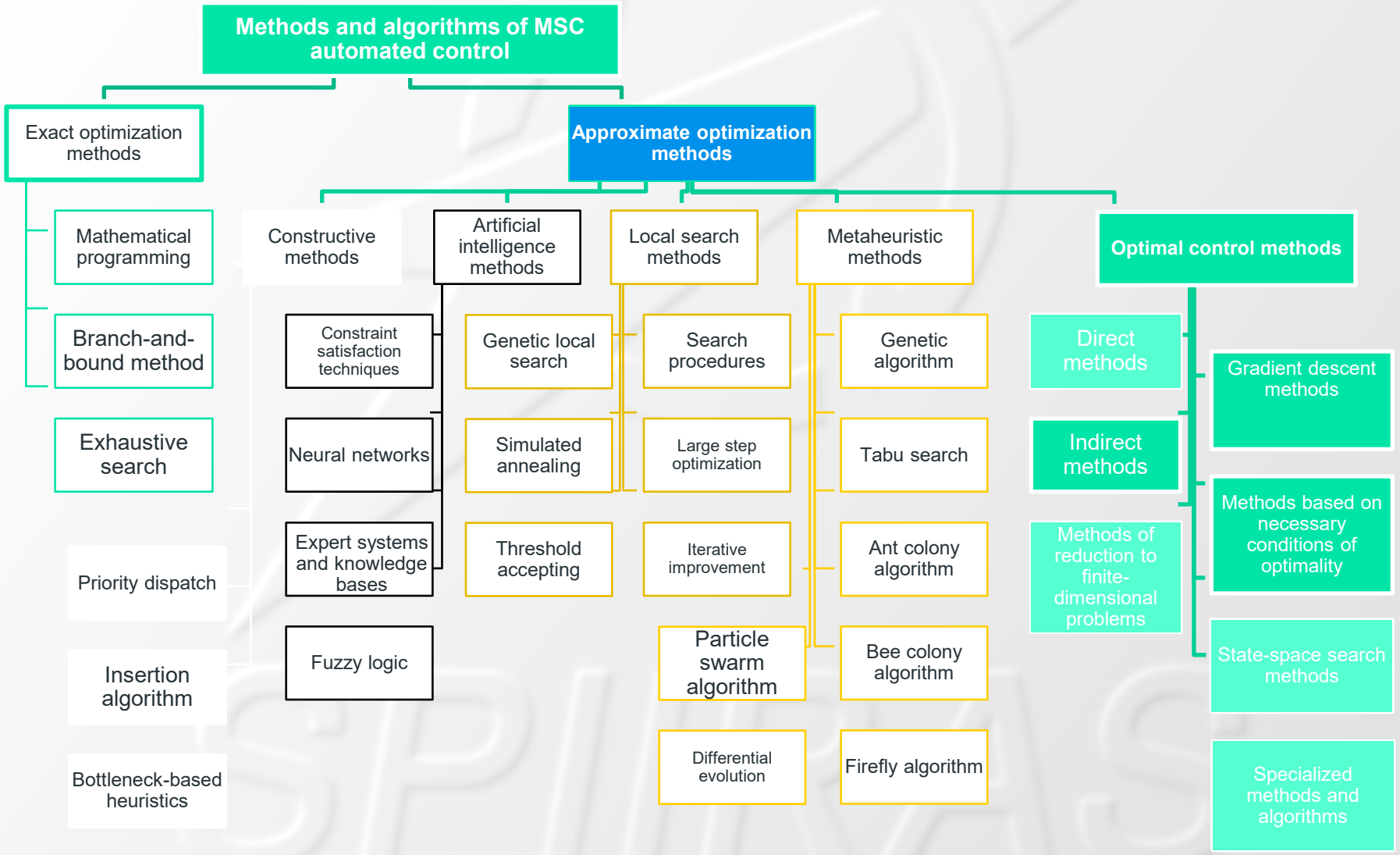



Approaches to knowledge representation
Procedural
Hybrid
Declarative
Object-oriented approach
Semantic networks with attached procedures
Algorithmic implementation of the domain model
G-model
Frames
Predicate calculus
Production rules
Semantic networks
Formal production systems
Heuristic (formalized)
Logical (formal)
Knowledge representation models

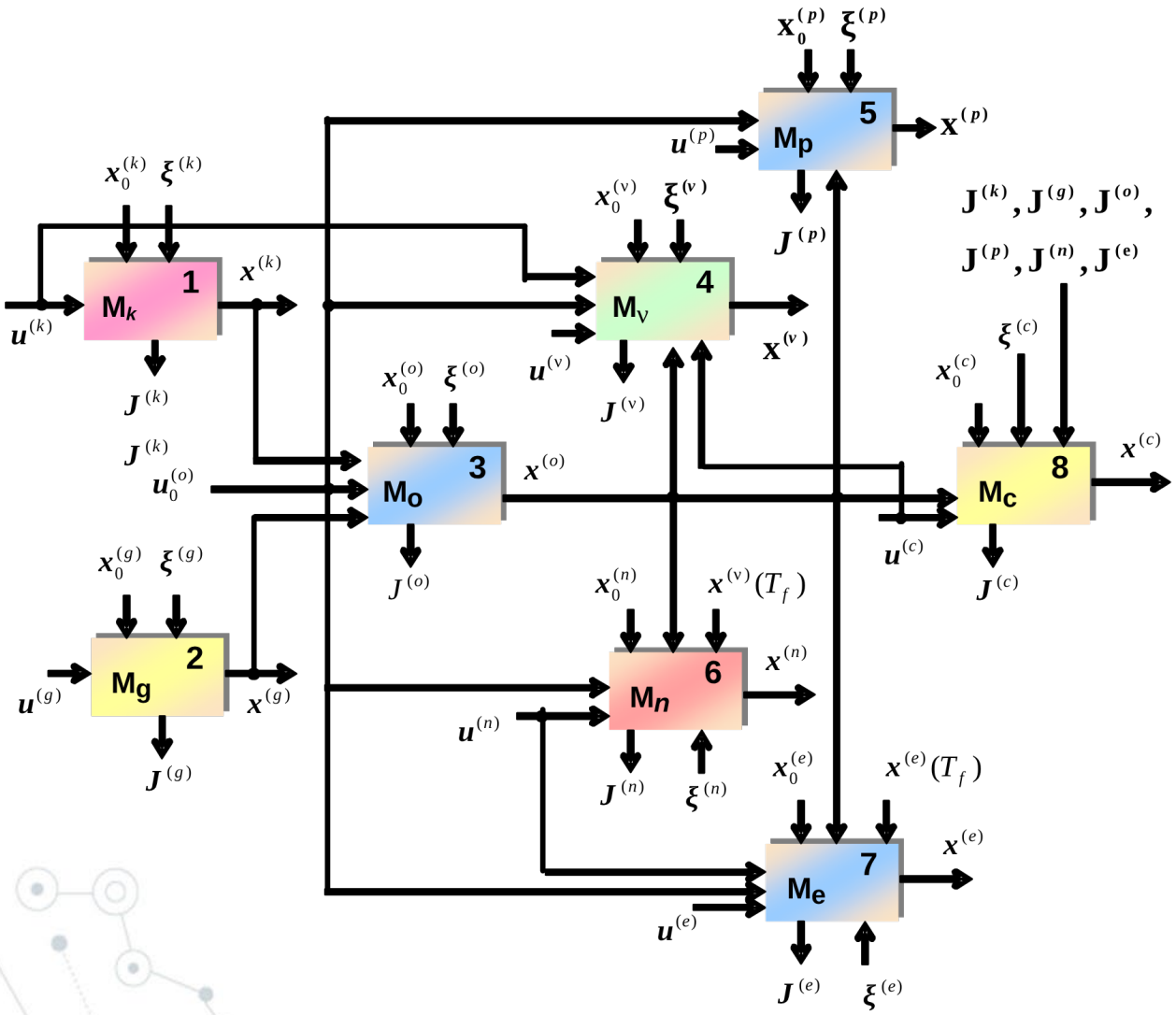
Main results of solving MSC structural dynamics analysis problems

The main results of classical control theory	Practical implementation of the results
Criteria for existence of a solution in CO structure-dynamics control (SDC) problems	Verification of the adequacy of the description of MSC control processes in control models
Criteria for controllability and attainability in CO SDC problems	Verification of the feasibility of MSC control technologies over the control interval; determination of the main factors affecting MSC goal abilities and information technology abilities
Criteria for uniqueness of optimal program control in CO application planning problems	Analysis of the possibility to obtain optimal MSC application plans
Necessary and sufficient conditions of optimality in CO SDC problems	Preliminary analysis of the structure of optimal MSC control programs
Criteria for stability and sensitivity in CO SDC problems	Evaluation of MSC SDC stability and sensitivity to perturbations and to alteration of the composition and structure of input data

Existing and prospective methods of proactive MSC control



Generalized structure of the developed basic multiple-model complex



Mg – logical-dynamic models of CPS motion control (spatial constraints);

M_k – logical-dynamic models of channel control;

Mo – logical-dynamic models of operations control (technological constraints);

M_n – logical-dynamic models of flow control;

Mp – logical-dynamic models of resource control (technical constraints);

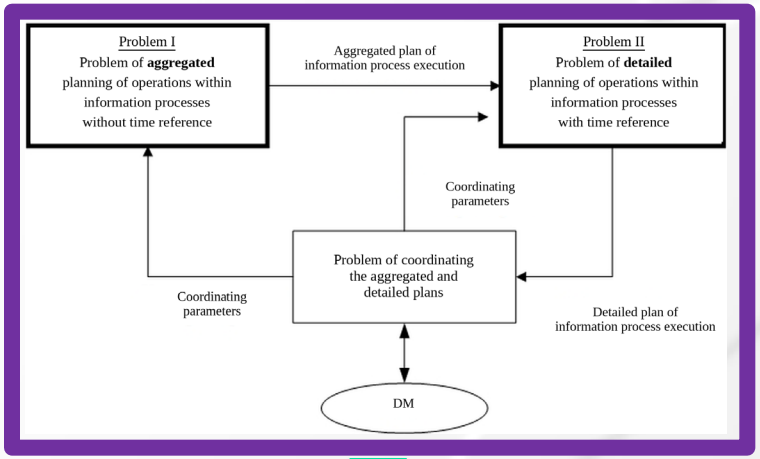
Me – logical-dynamic models of operation parameters control;

Mc – logical-dynamic models of structural dynamics control;

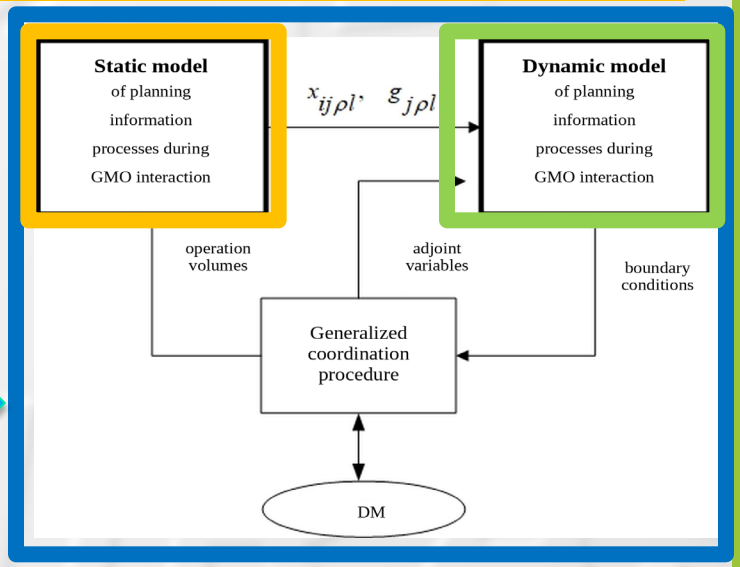
Mv – logical-dynamic models of auxiliary operations control.

47

Transition from the generalized logical-dynamic model of proactive control of an SSC constellation to a combined multiple-model description of its proactive control (SUAI, V.A. Ushakov, PhD)



The proposed static model takes into account factors, processes and constraints such as data losses, as well as constraints on the sequence of operations and on their non-preemptive execution.



The proposed dynamic model (DM) provides a detailed description of data distribution and processing linked to specific time instants.
In this case, the DM can constructively take into account constraints on uniform resource utilization, penalties for violation of directive deadlines and other time factors.

Static planning model of an SSC constellation during interaction of a group of mobile objects (SUAI, V.A. Ushakov, PhD)

Generalized planning quality indicator:

$$\alpha_1 I_1 - \alpha_2 I_2 = I_0 \to \max_{\vec{x} \in \square} \quad (1)$$

Total volume of processed data

Total volume of lost data

(2)

$$I_1 = \sum_{\rho=1}^{P} \sum_{j=1}^{n} \sum_{l=1}^{L} g_{j\rho l} \qquad I_2 = \sum_{\rho=1}^{P} \sum_{j=1}^{n} \sum_{l=1}^{L} z_{j\rho l} \quad (13.3)$$

where $\alpha_1 + \alpha_2 = 1 \qquad \alpha_1, \alpha_2 \geq 0 \qquad \vec{x} = \| x_{j\rho l}^{(\epsilon x)}, x_{ij\rho l}, y_{j\rho l}, g_{j\rho l}, z_{j\rho l} \|$

Static mathematical model of planning information processes during interaction of mobile objects ( ):

$$\sum_{\rho \in P} x_{j\rho l}^{(\epsilon x)} = \sum_{\rho \in P} ((\sum_{i \in M_{jl}^{(+)}} x_{ij\rho l} - \sum_{i \in M_{jl}^{(-)}} x_{ij\rho l}) + (y_{j\rho l} - y_{j\rho(l-1)}) + g_{j\rho l} + z_{j\rho l}); \quad (13.4)$$

where $i, j = 1,2,\ldots,n;\ \rho = 1,2,\ldots,P;\ l = 1,2,\ldots,L$

Technical constraints:

$$0 \leq \sum_{\rho \in P} x_{ij\rho l} \leq \psi_{ijl}; \quad (13.5)$$

$$0 \leq \sum_{\rho \in P} (y_{j\rho l} + g_{j\rho l}) \leq V_j; \quad (13.6)$$

$$0 \leq \sum_{\rho \in P} g_{j\rho l} \leq \varphi_{jl}; \quad (13.7)$$

$$g_{j(\rho+1)l} = s_\rho g_{j\rho l}; \quad (13.8)$$

$$0 \leq z_{j\rho l}; \quad (13.9)$$

Thus, the problem of planning information processes during interaction of mobile objects is reduced to a high-dimensional multi-criteria linear programming problem.

Dynamic planning (program control) model of an SSC constellation during interaction of a group of mobile objects (MO) (SUAI, V.A. Ushakov, PhD)

Dynamic model of SpC program control during interaction of mobile objects:

program control model of data (information) reception/transmission

$$\dot{x}_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) = u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \quad (14.1)$$

program control model of data processing

$$\dot{x}_{j\rho l}^{(n,2)}(t) = u_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \quad (14.2)$$

auxiliary model determining the direction of data reception/transmission

$$\dot{x}_{ij\rho l}^{(n,3)}(t) = \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \quad (14.3)$$

auxiliary model determining in which MO a given type of data is processed

$$\dot{x}_{j\rho l}^{(n,4)}(t) = \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \quad (14.4)$$

Auxiliary model determining the boundaries of the intervals of constancy of the GMO information interaction structure

$$\dot{x}_{l}^{(o,1)}(t) = u_{l}^{(o,1)}(t) \quad (14.5)$$

Boundary conditions:

$$x_{l}^{(o,1)}(t_{0l}) = x_{ij\rho l}^{(n,1)}(t_{0l}) = x_{j\rho l}^{(n,2)}(t_{0l}) = x_{ij\rho l}^{(n,3)}(t_{0l}) = x_{j\rho l}^{(n,4)}(t_{0l}) = 0; \quad (14.6)$$

$$x_{l}^{(o,1)}(t_{fl}) = T_{l}^{(o,1)}; \quad \sum_{\rho=1}^{P} x_{ij\rho l}^{(n,1)}(t_{fl}) = x_{ijl}; \quad \sum_{\rho=1}^{P} x_{j\rho l}^{(n,2)}(t_{fl}) = g_{jl}; \quad (14.7)$$

$$x_{ij\rho l}^{(n,3)}(t_{fl}) \in \square^{+}; \quad x_{j\rho l}^{(n,4)}(t_{fl}) \in \square^{+};$$

Interconnection with the static model via boundary conditions

Technological constraints:

$$u_{l}^{(o,1)}(t)(T_{l}^{(o,1)} - \dot{x}_{l}^{(o,1)}(t)) = 1; \quad (14.8)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^{n} \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) + \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \leq 1; \ \rho = 1,2,\ldots,P; \ l = 1,2,\ldots,L \quad (14.9)$$

$$u_{l}^{(o,1)}(t), \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t), \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \in \{0,1\} \quad (14.10)$$

$$0 \leq \xi_{ij}^{(b,1)} \leq 1; \quad 0 \leq \xi_{j}^{(b,2)} \leq 1; \quad (14.11)$$

Technical constraints:

$$0 \leq u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \leq c_{ij\rho l}^{(n,1)} \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) u_{l}^{(o,1)}(t); \quad (14.12)$$

$$\sum_{\rho=1}^{P} u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \leq d_{ijl}^{(1)} \xi_{ij}^{(b,1)}; \quad (14.14)$$

$$0 \leq u_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \leq c_{j\rho l}^{(n,2)} \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t) u_{l}^{(o,1)}(t); \quad (14.13)$$

$$\sum_{\rho=1}^{P} u_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \leq d_{jl}^{(2)} \xi_{j}^{(b,2)}; \quad (14.15)$$

Thus, the planning problem on the dynamic model is as follows: it is necessary to transfer the dynamic system (14.1)–(14.5) from the given initial state (14.6) to the given final state (14.7) subject to constraints (14.8)–(14.15).

DM of planning (program control) of an SSC constellation during interaction of a group of mobile objects (MO) (SUAI, V.A. Ushakov, PhD).

(quality indicators of SpC planning during GMO interaction)

Main quality indicators of SpC planning during GMO interaction:

Interconnection with the static model

$$J_4 = \frac{1}{2}\left[\sum_{l=1}^{L}\sum_{i=1}^{n}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n}\left(x_{ijl} - \sum_{\rho=1}^{P} x_{ij\rho l}^{(n,1)}(t_{fl})\right)^2 + \sum_{l=1}^{L}\sum_{j=1}^{n}\left(g_{jl} - \sum_{\rho=1}^{P} x_{j\rho l}^{(n,2)}(t_{fl})\right)^2\right]; \quad (15.1)$$

Indicator of the total volume of transmitted and processed information

$$J_2 = \sum_{l=1}^{L}\sum_{\rho=1}^{P}\sum_{j=1}^{n}\int_{t_{0l}}^{t_{fl}} \gamma_{j\rho l}(t)\omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t)dt; \quad (15.2)$$

Indicator of the total penalty for violation of directive deadlines of operations within the corresponding information processes

Additional quality indicators of SpC planning during GMO interaction:

generalized quality indicator of information process planning

Indicator of the total integral quality of the planned operations within the corresponding information processes

$$J_3 = \sum_{l=1}^{L}\sum_{\rho=1}^{P}\sum_{j=1}^{n}\int_{t_{0l}}^{t_{fl}} \beta_{j\rho l}(t)\omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t)dt; \quad (15.3)$$

Indicators of the degree of uniformity (non-uniformity) of MO resource utilization for each subinterval of structure constancy

$$J_5 = \frac{1}{2}\sum_{l=1}^{L}\sum_{\rho=1}^{P}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{n}\left(T_l^{(o,1)} - x_{ij\rho l}^{(n,3)}(t_{fl})\right)^2; \quad (15.4)$$

$$J_6 = \frac{1}{2}\sum_{l=1}^{L}\sum_{\rho=1}^{P}\sum_{j=1}^{n}\left(T_l^{(o,1)} - x_{j\rho l}^{(n,4)}(t_{fl})\right)^2; \quad (15.5)$$

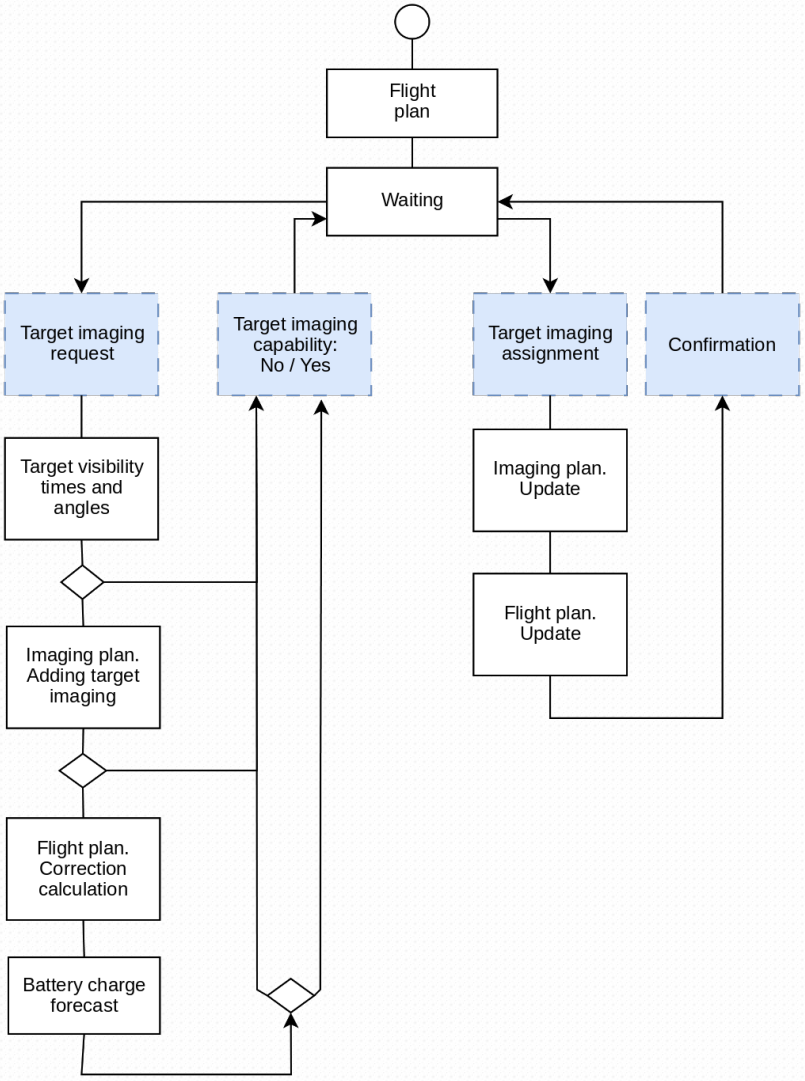
$$J_{об} = \sum_{m=1}^{5}\lambda_m \bar{J}_m; \quad (15.6)$$

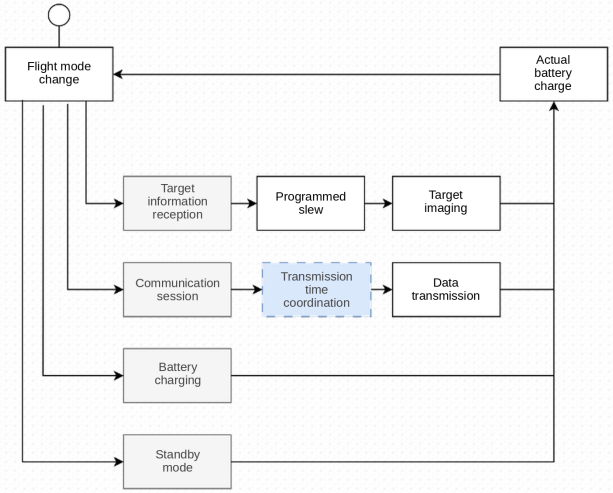
$$\sum_{m=1}^{5}\lambda_m = 1; \quad (15.7)$$

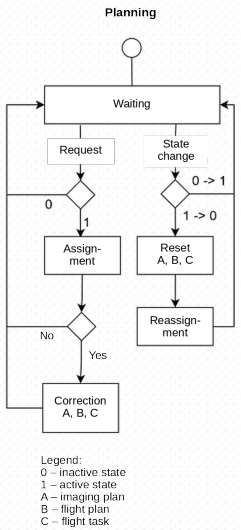
$$\bar{J}_m = \frac{J_m}{J_m^*}; \quad (15.8)$$

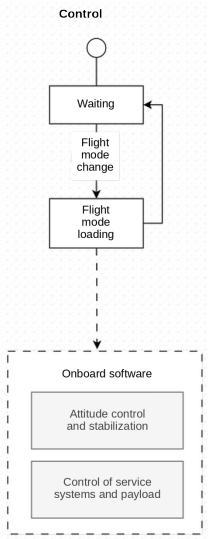
Generalized structure of the developed basic multiple-model complex

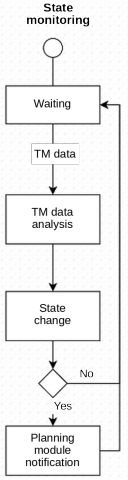
SSC agent behavior model







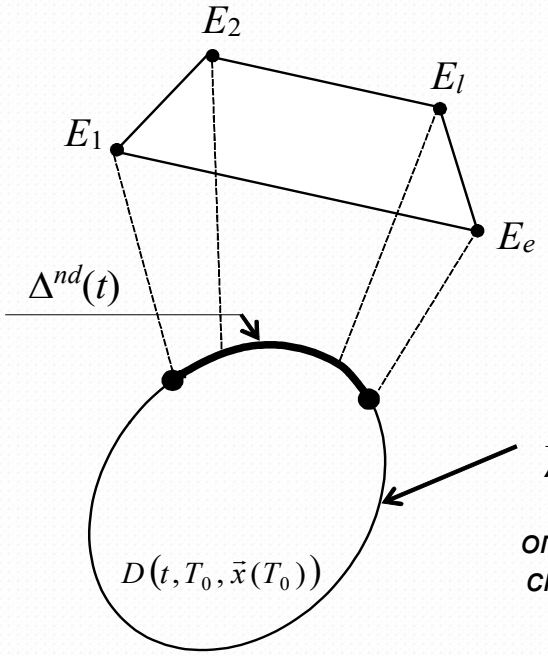




Обобщенная процедура решения задач выбора программ проактивного управления структурной динамикой МГ

На первой фазе *осуществляется формирование (генерирование) допустимых вариантов многоструктурных макросостояний МГ КА или, по-другому, осуществляется структурно-функциональный синтез нового облика МГ, соответствующего складывающейся (прогнозируемой) обстановке*

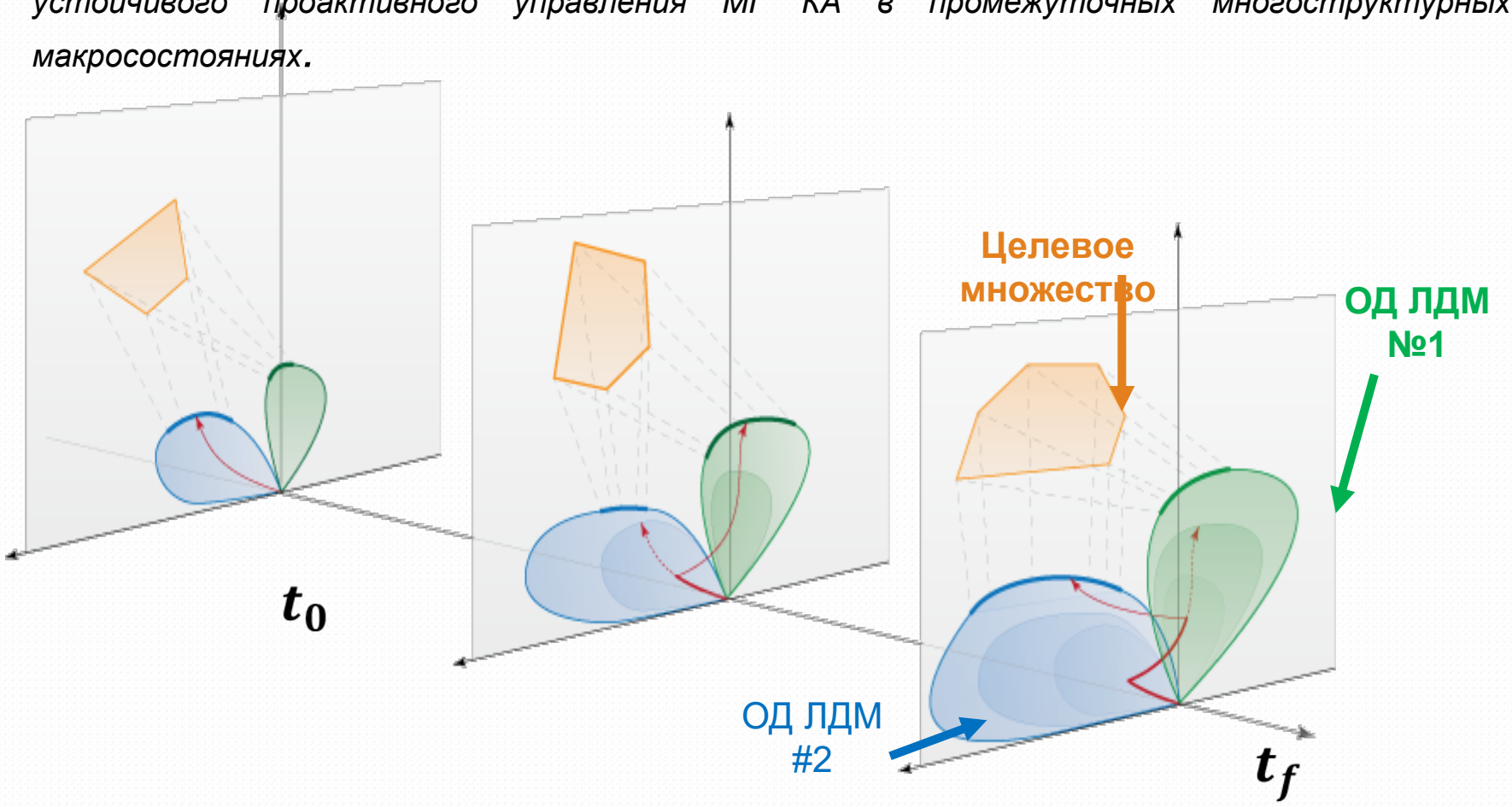
Ортогональное проектирование целевого множества на ОД позволяет получить множество допустимых вариантов многоструктурных макросостояний МГ (множество В. Парето)



Аппроксимированное ОД системы ЛДМ, описывающих управляемую структурную динамику СУ МОГ

Обобщенная процедура решения задач выбора программ проактивного управления структурной динамикой МГ

На второй фазе *проводится выбор конкретного варианта многоструктурного макросостояния МГ КА с одновременным синтезом (построением) адаптивных планов (программ) проактивного управления переходом МГ КА из текущего в требуемое (выбранное) макросостояние. При этом рассматриваемые планы должны обеспечивать такое эволюционное развитие МГ КА при котором наряду с реализацией программ перехода из соответствующих макросостояний предусматривается одновременно и реализация программ устойчивого проактивного управления МГ КА в промежуточных многоструктурных макросостояниях.*



Аппроксимация областей достижимости на основе гибридных нейросетевых моделей (ГУАП, ктн доц. Скобцов В.Ю.)

Схема взаимодействия блоков гибридной модели (ARIMA/SARIMA + HNN)



Аппроксимация областей достижимости на основе гибридных нейросетевых моделей (ГУАП, ктн доц. Скобцов В.Ю.)

Методология декомпозиции и роли модулей

1. Блок ARIMA/SARIMA (Физический базис)

- **Моделирование регулярности**
Аппроксимирует жестко детерминированные витковые циклы, радиовидимость и фоновую динамику нагрева.

- **Исключение сноса границ**
Фиксирует базисный каркас фазового объема выполнения операций ГКВ, предотвращая накопление дрейфа при долгосрочном прогнозе.

- **Расчет остатков (Residuals)**
Формирует ряд невязок e(t) = y(t) - y_ARIMA(t), содержащий стохастические и нелинейные эффекты.

2. Нейросетевой компенсатор HNN

- **Совместный вход компонентов**
Подача остатков e(t) вместе с исходным вектором X(t) позволяет нейросети компенсировать нелинейности с учетом физического контекста.

- **1D-CNN + BiLSTM каскад**
1D-CNN извлекает локальные всплески нагрузки; BiLSTM анализирует временную предысторию в обоих направлениях.

- **Spatial-Temporal Attention**
Фокусирует вычислительные ресурсы на криогенных/тепловых пиках, связанных с ГКВ и межспутниковых задержках.

Аппроксимация областей достижимости на основе гибридных нейросетевых моделей (ГУАП, ктн доц. Скобцов В.Ю.)

Сравнительный анализ подходов и результаты

Критерий оценки	Численные методы (DeepReach, Сеточные)	Чистые НС (PINN, Neural ODEs)	Предлагаемый гибридный метод
Бортовая вычислимость	Низкая (часы расчетов на Земле)	Средняя (высокая емкость памяти)	**Высокая (миллисекунды на USEC)**
Устойчивость границ	Гарантированная (высокие затраты)	Снос на длинных горизонтах	**Гарантированная (фиксация ARIMA)**
Учет нелинейных пиков	Ограничен сеткой дискретизации	Удовлетворительный	**Высокий (компенсатор HNN)**

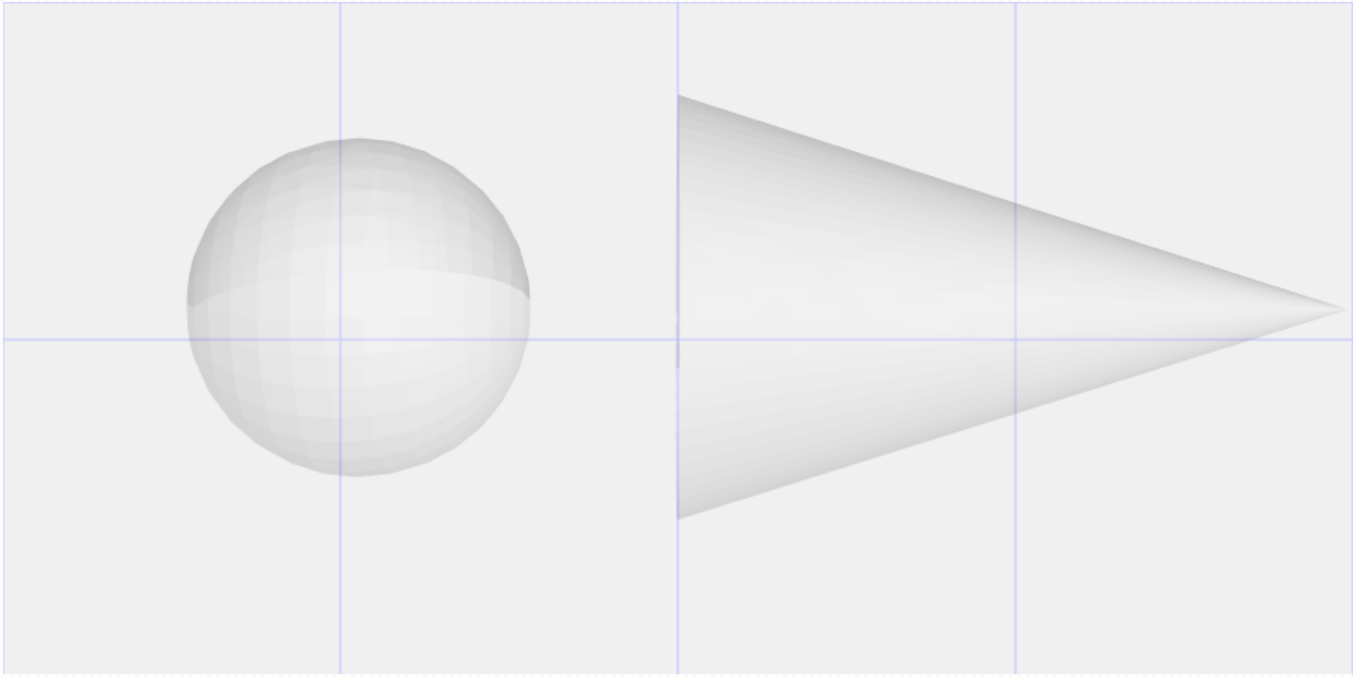
Точность и производительность

- Коэффициент детерминации $R^2 > 0.99$ при аппроксимации фазовых границ
- Ускорение расчета в 10^3-10^4 раз по сравнению с методом сетки
- Полное соответствие ограничениям по энергопотреблению бортовых информационно-вычислительных ресурсов

Практическое значение

- Обеспечивает термодинамическую безопасность проактивного управления решением задач ГКВ
- Автоматически учитывает ограничения по сбросу тепла в космическом вакууме
- Интегрируется в логико-динамические модели (ЛДМ) проактивного управления ГКВ

Example of projections of intersecting three-dimensional figures



4. Examples of Solving Applied Problems of Proactive Control of Space Computing Using an MSC

SPIRAS

Study of various technologies for controlling the target application of an ERS multi-satellite constellation

The required level of efficiency of the target application of an ERS multi-satellite orbital constellation (OC) is achieved when its control is regarded as “control of the system as a whole rather than of a set of individual SC”.

To this end, an agent-oriented approach is proposed that implements the transition from traditional centralized program-command control to technologies of decentralized coordinate-time self-organizing control based on information interaction between the space system objects.

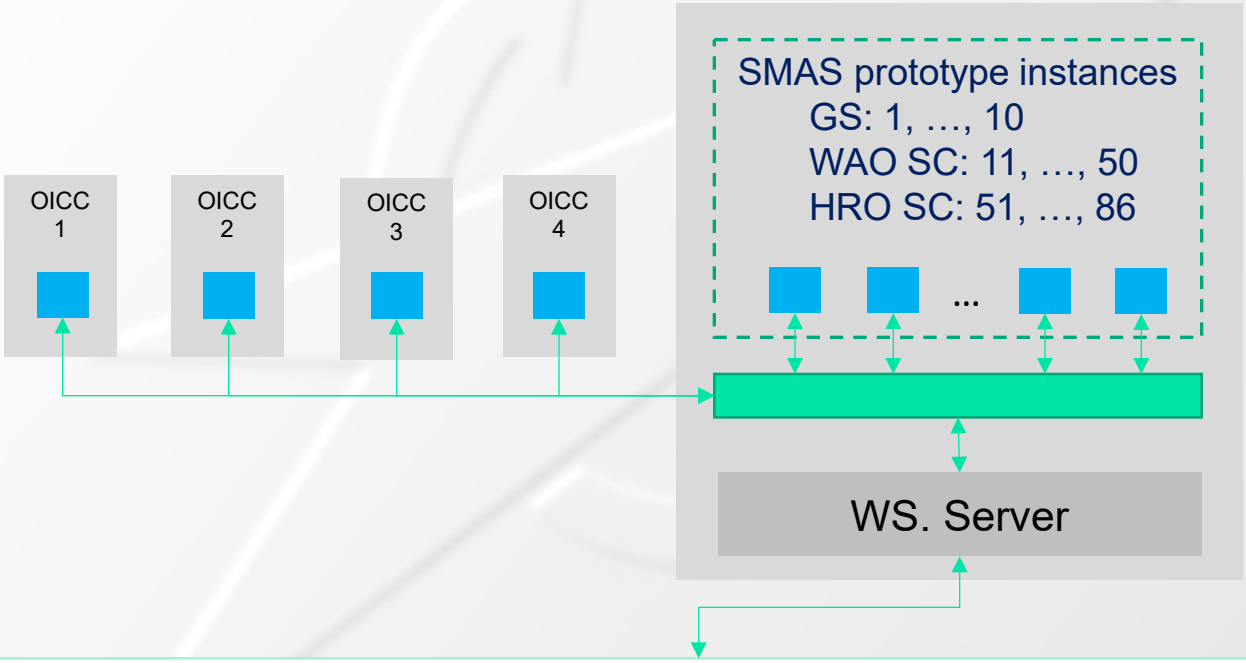
It is assumed that the main tasks developed in the special model-algorithmic support (SMAS) prototype are transferred to the OCC level.

Special model-algorithmic support

SMAS prototype

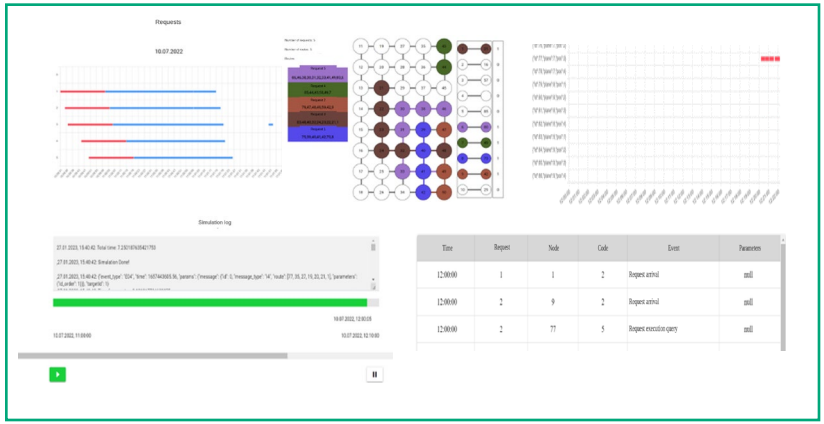
- Secondary ballistics
- Autonomous imaging planning
- Allocation and reallocation of requests
- Data transmission routing
- Configuration and reconfiguration of SC onboard systems and devices

Structure of the developed software package

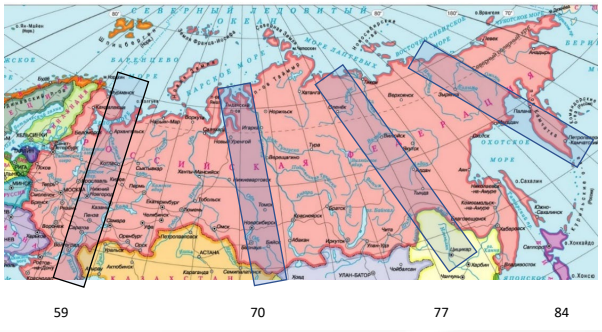


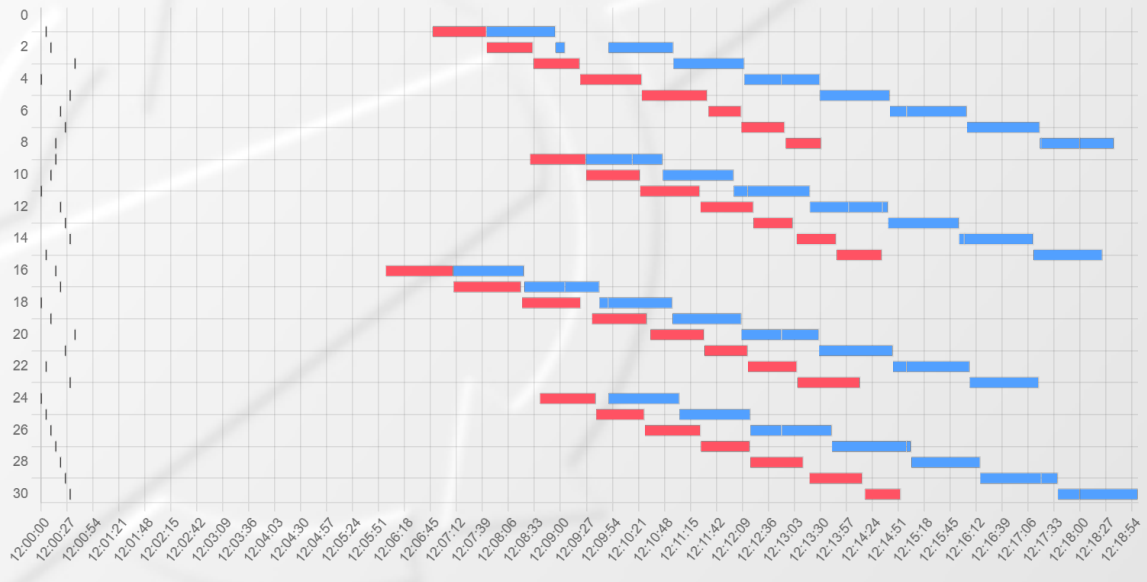
WS. Interface

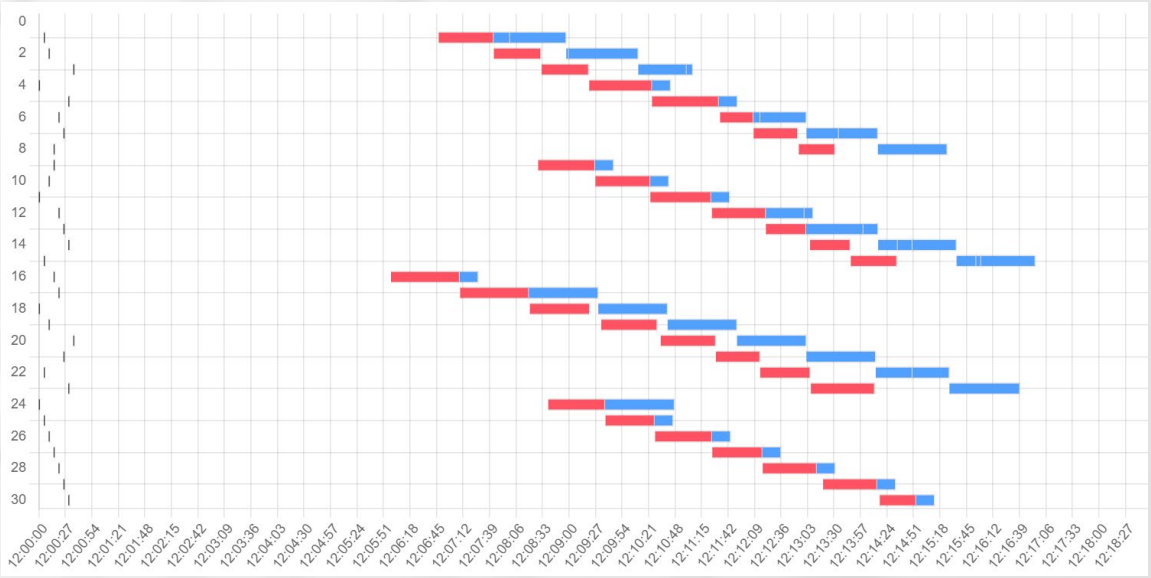
- Orbital parameters of the WAO and HRO SC constellation
- Ground station coordinates
- Contact plans
- Backbone network
- Reconfiguration
- Target imaging requests
- Optional system parameters



Request execution plans



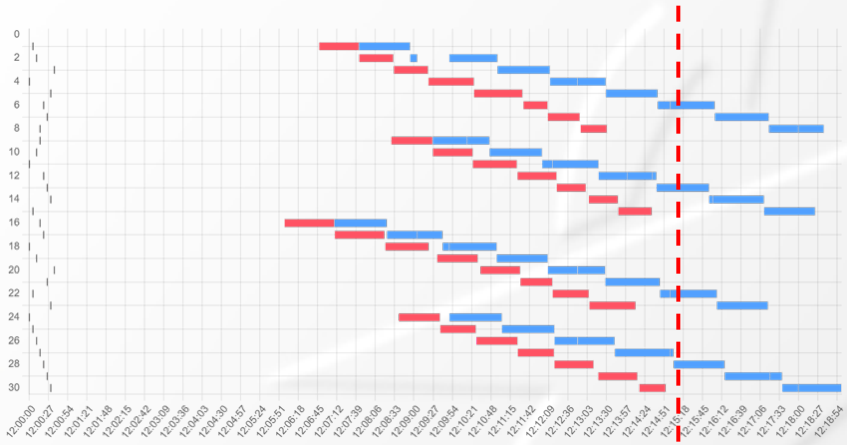




Request execution:

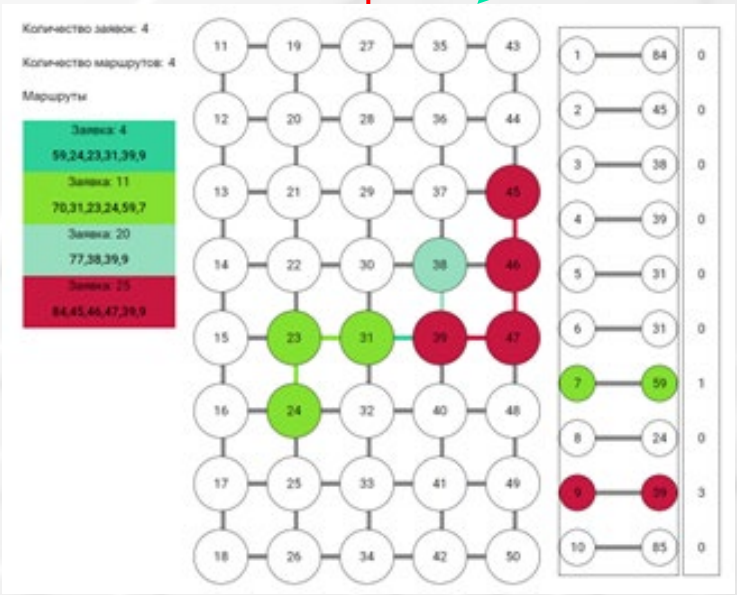
- **arrival and allocation of requests** (secondary ballistics, autonomous planning, allocation protocol)
- **imaging,** (starting from the time of the programmed slew maneuver)
- **delivery of imagery to GS:**
  - to specified GS
  - to any GS

Data transmission routes



Data transmission routes established at the current time

Visualization of the main part of the route in the backbone network



Nodes of the established routes for request data transmission

SC–GS communication links:

- **established at the current time**
- **number of routes using each link**

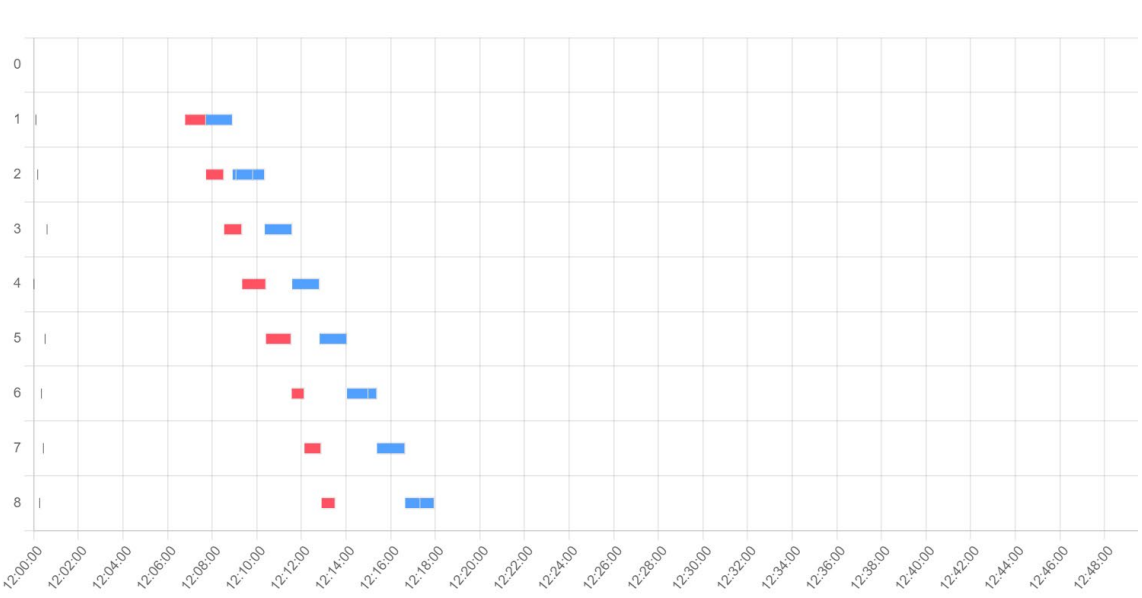
Scenario 2. Request reallocation

Imaging planning by reallocating lower-priority requests

Example:

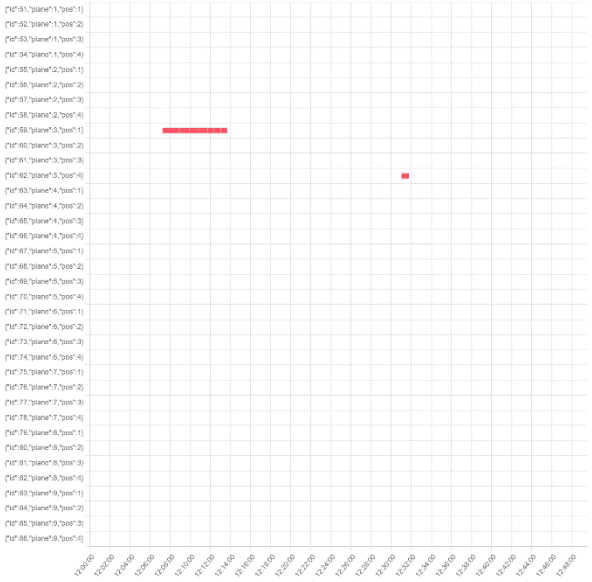
High-priority request 9 is assigned to HRO SC 59

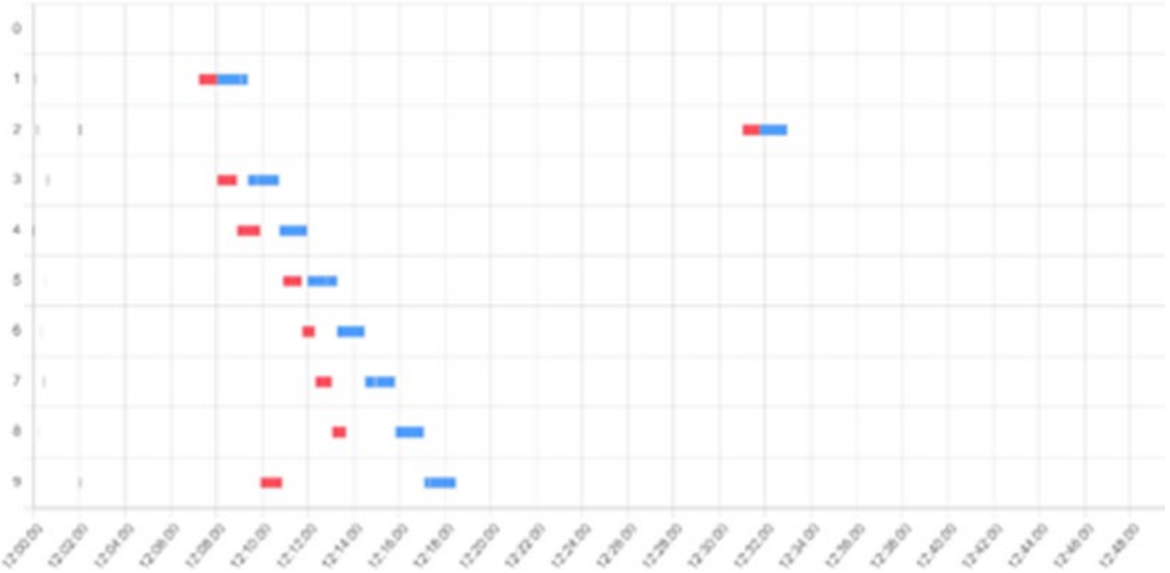
Lower-priority request 2 is reassigned to HRO SC 62



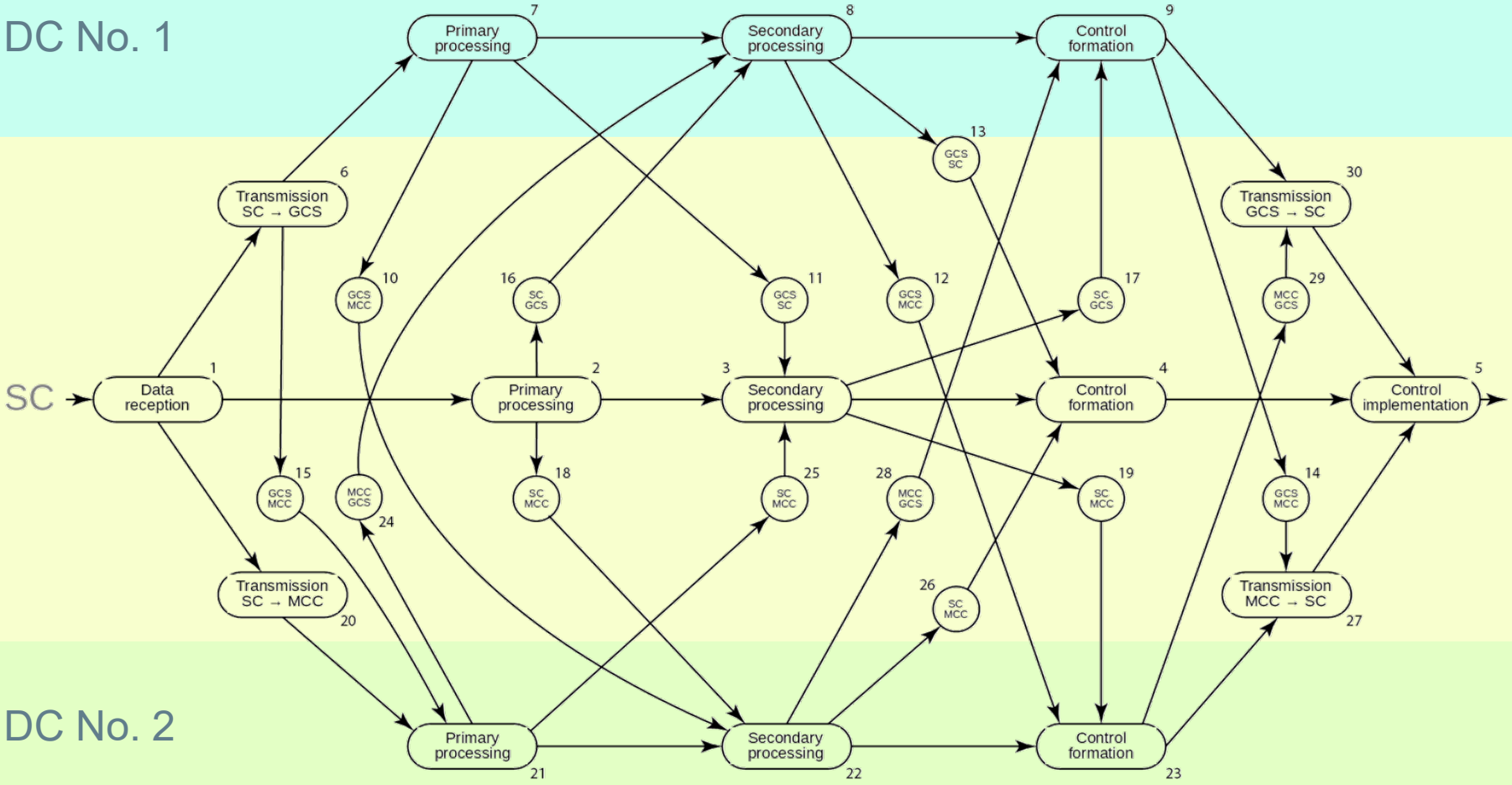
On OICC:

- WAO SC 11
- HRO SC 59, 62



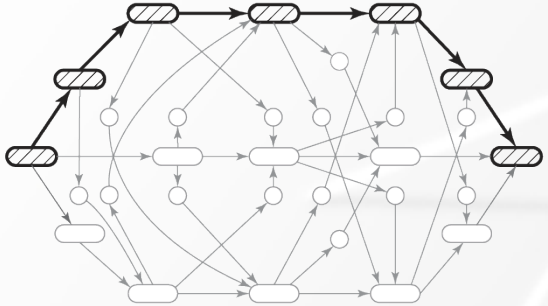


Problem of allocating control functions between the onboard and ground control complexes of ERS SC

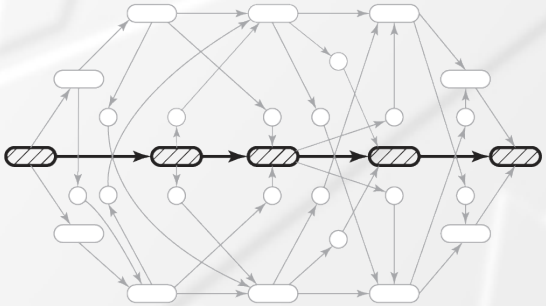


Overall effect of the proposed method

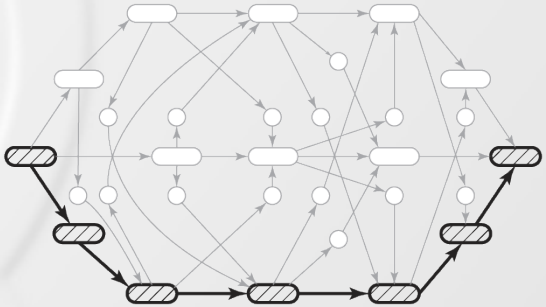
Task solving in GCC No. 1



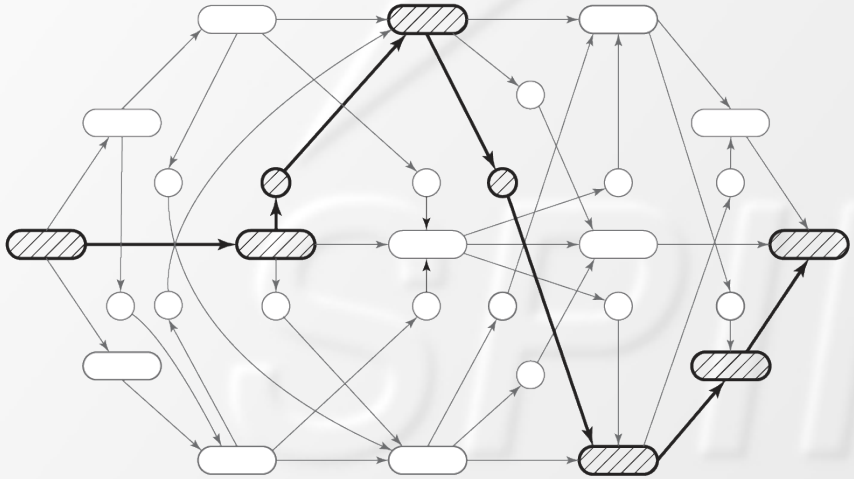
Task solving on board the SC



Task solving in GCC No. 2



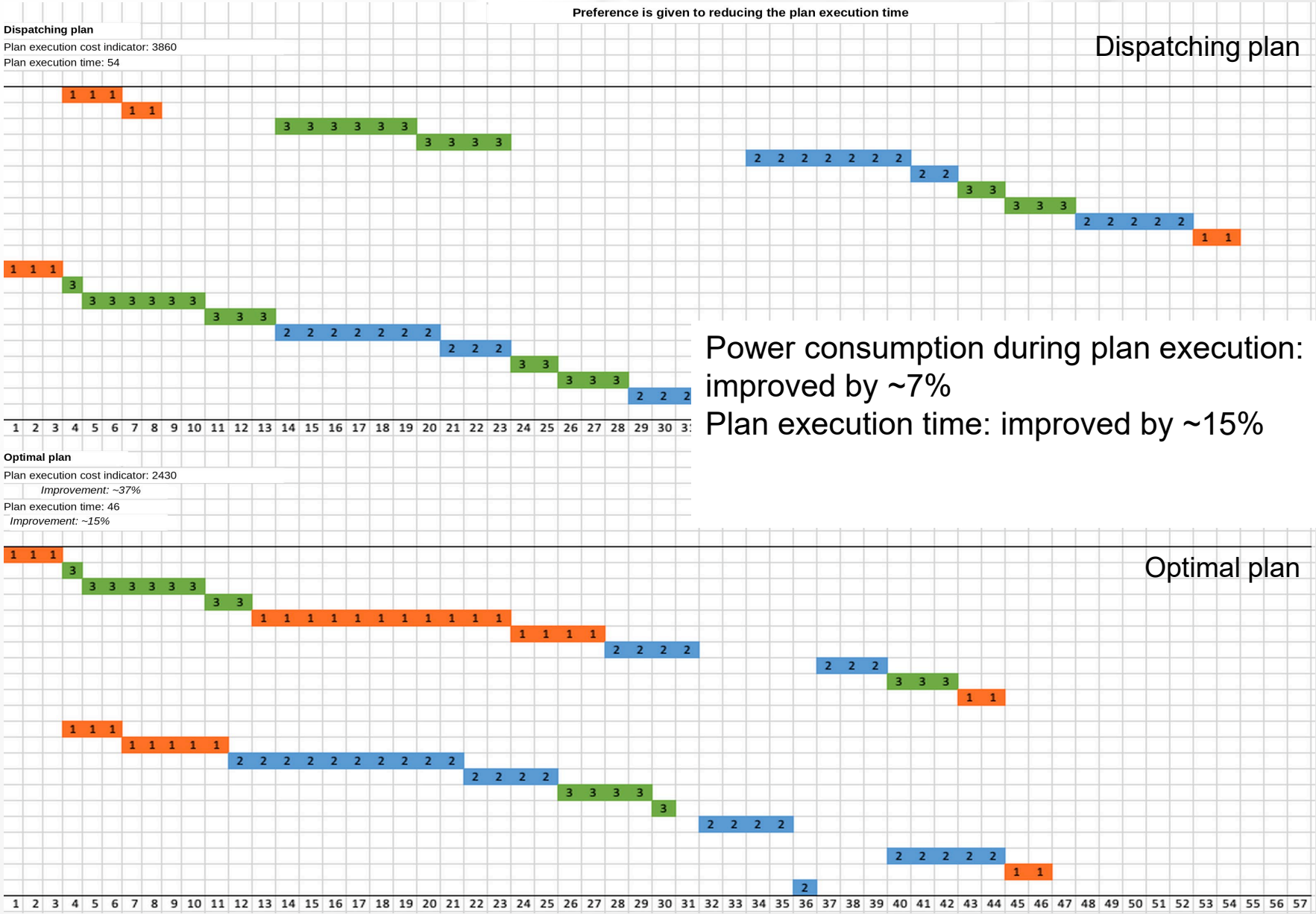
Synthesized technology



Reduction in energy consumption
– by 21% on average
Reduction in execution time
– by 6% on average
More uniform resource utilization
– by 14% on average

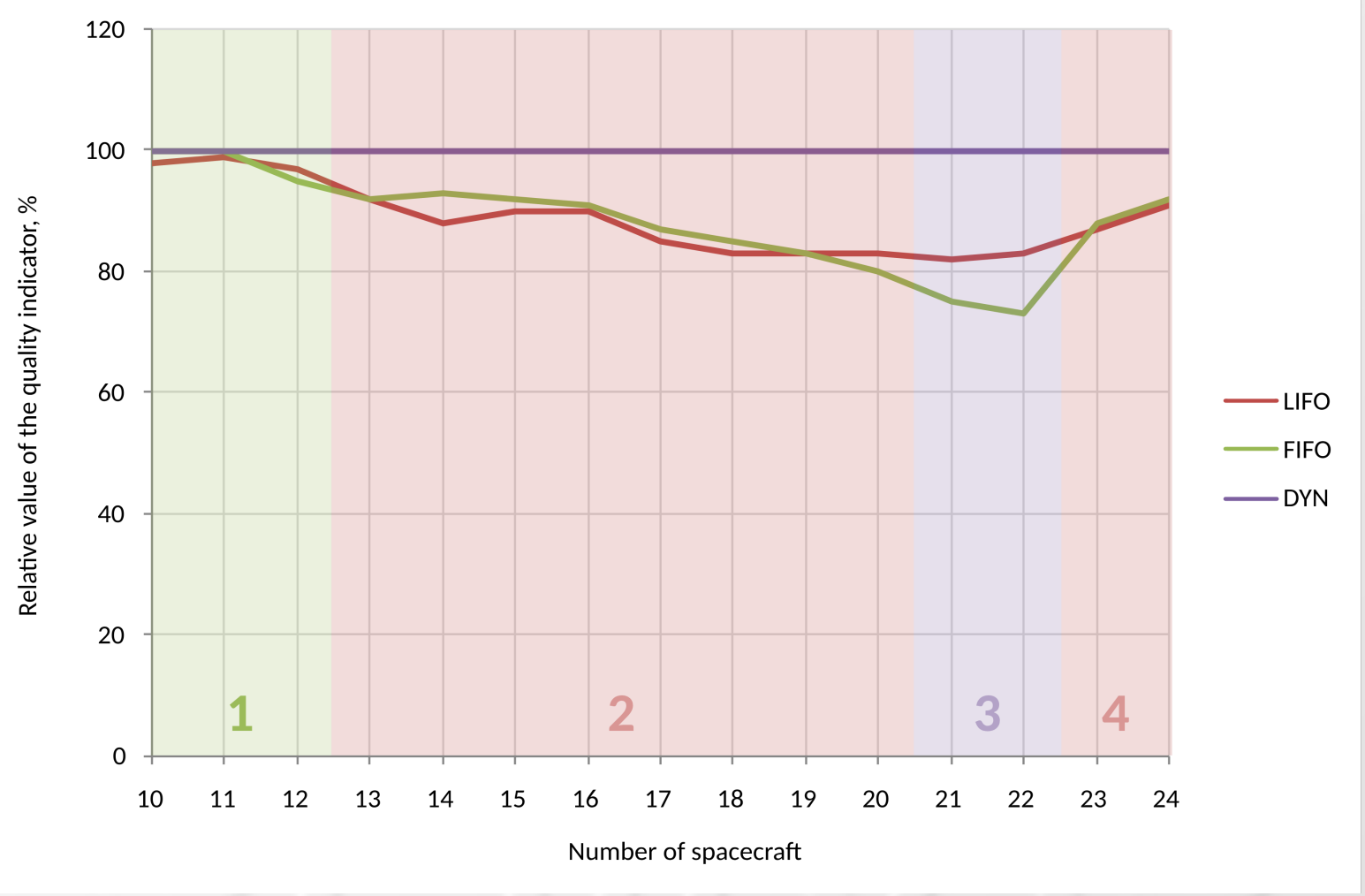
Improvement of the generalized plan quality indicator – by 26% on average

Optimization of resource costs



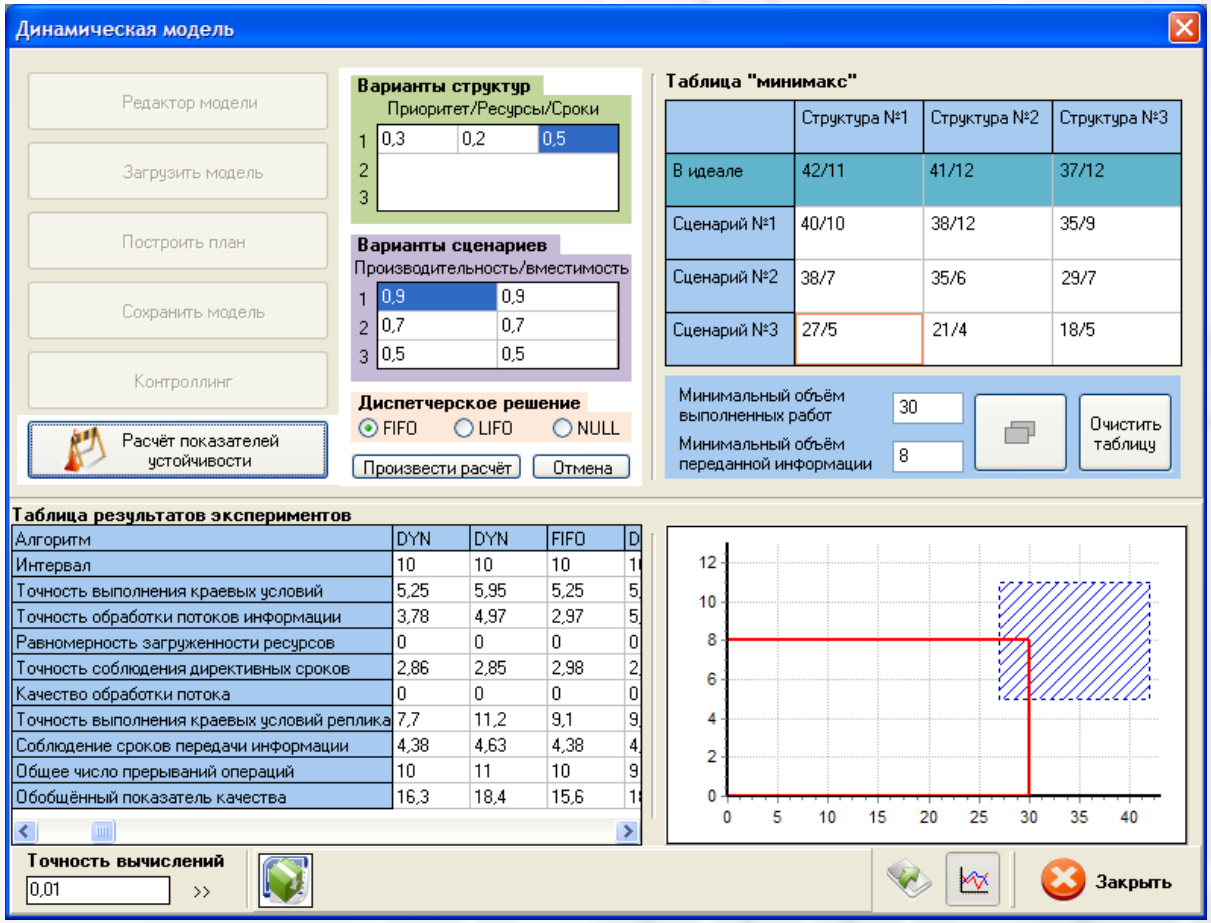
Power consumption during plan execution: improved by ~7%
Plan execution time: improved by ~15%

Results of planning MSC mission control center operation



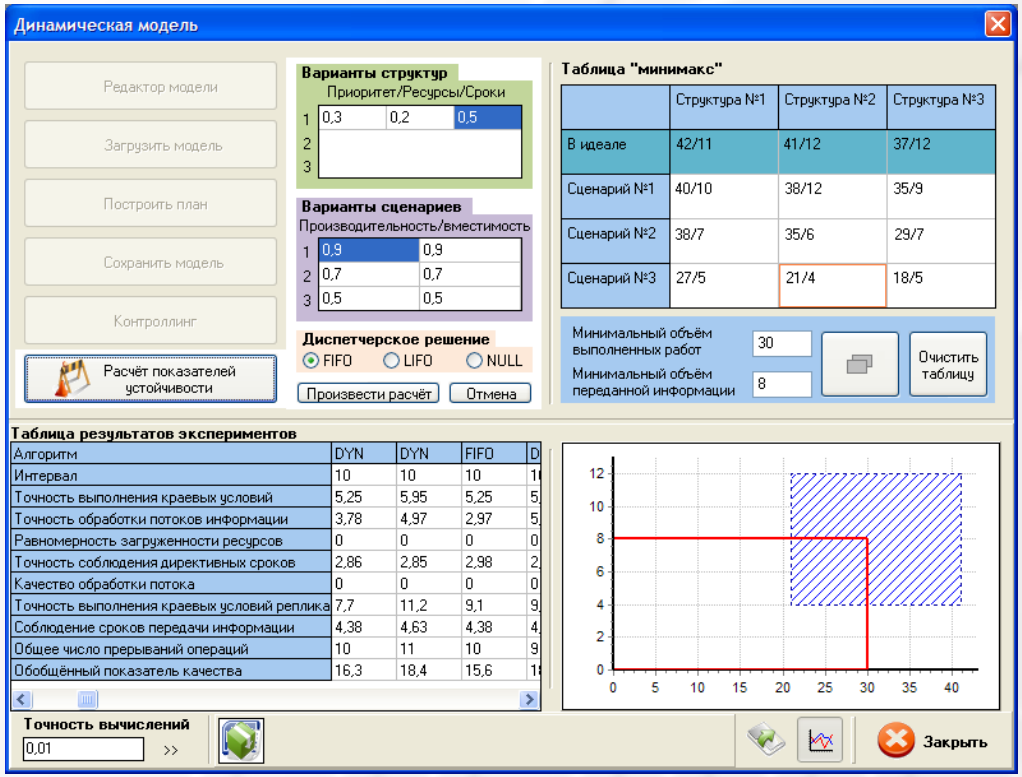
68

Results of assessing the robustness of operation plans of the SSC constellation control system



Operations are evenly distributed over unified resources

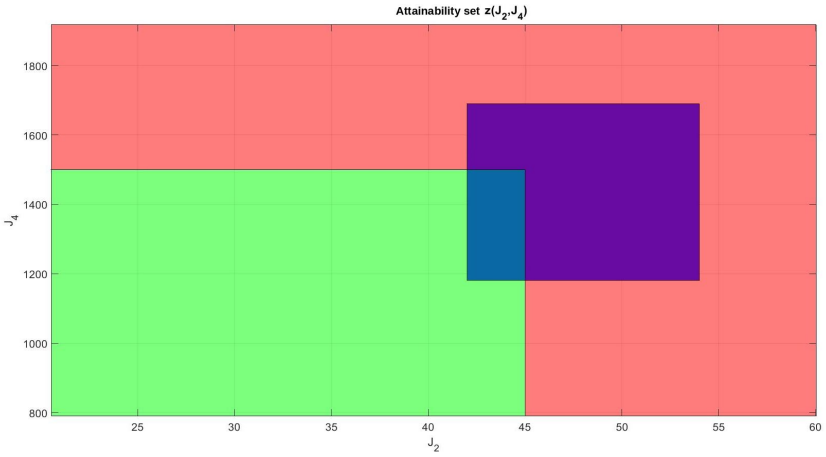
Results of assessing the robustness of operation plans of the SSC constellation control system

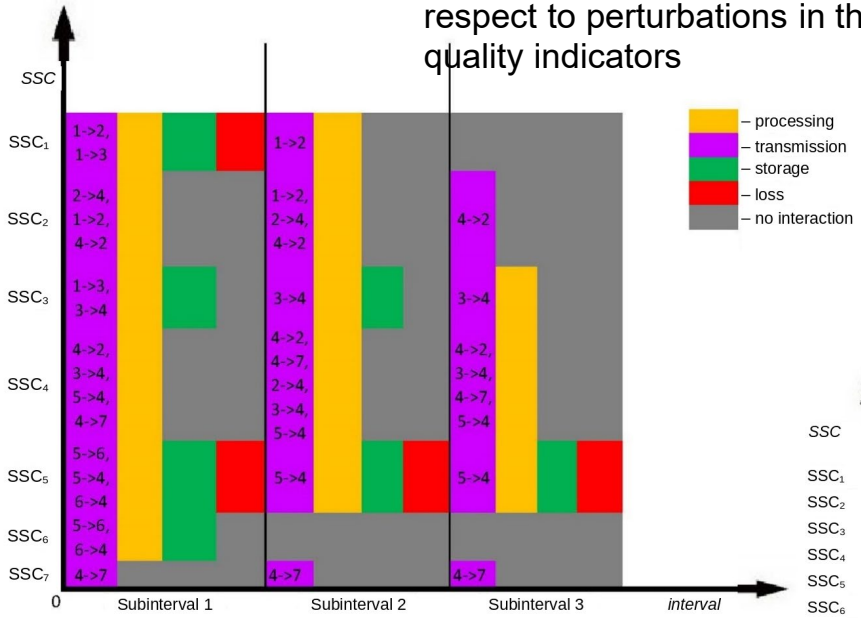


Operations are evenly distributed over heterogeneous resources

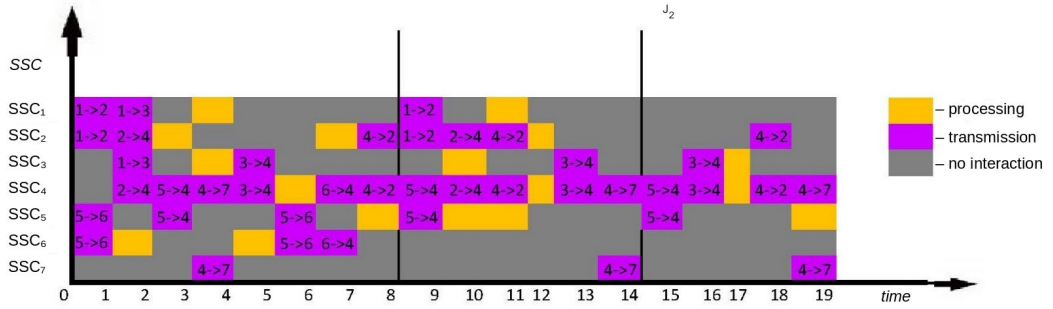
Results of operational optimal planning of information processes during interaction of a small spacecraft (SSC) constellation (SUAI, V.A. Ushakov, PhD)

Approximated attainability set with respect to perturbations in the space of quality indicators



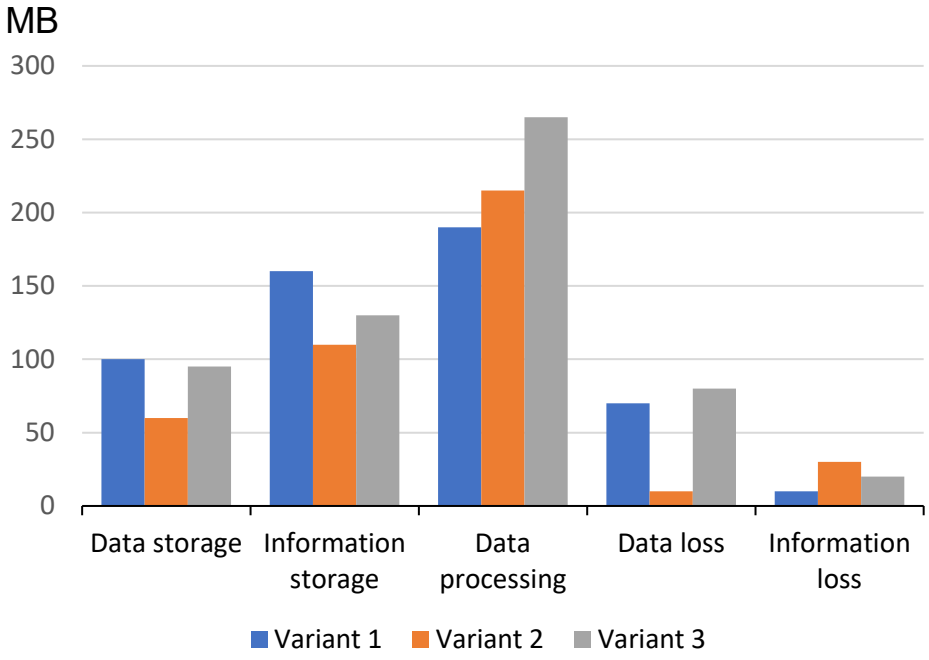


Visualization of the plan obtained with the static model



Visualization of the plan obtained with the dynamic model

Study of the impact of specialized small spacecraft (SSC) on the volume of information received by end users



Variant 1 (SSC specialized in data processing):

$\varphi_{jl} = 20\ MB / s, \psi_{ijl} = 10\ MB / s,$
for SSC j = 1..7

Variant 2 (SSC specialized in data transmission):

$\varphi_{jl} = 10\ MB / s, \psi_{ijl} = 20\ MB / s,$
for SSC j = 1..7

Variant 3 (mixed case):

$\varphi_{jl} = 10\ MB / s, \psi_{ijl} = 3\ MB / s,$
for SSC j = 1, 5, 7

$\varphi_{jl} = 3\ MB / s, \psi_{ijl} = 10\ MB / s,$
for SSC j = 2, 3, 4, 6

Thus, the end user receives the maximum amount of information (processed data) with minimal losses when specialized SSC are used in a mixed composition (Variant 3). Therefore, it is important to choose the optimal ratio of multifunctional and specialized SSC to accomplish the target task.

SCIENTIFIC AND TECHNICAL PROGRAM OF THE UNION STATE "COMPLEX-SG" Activity No. 4

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР ИМЕНИ М. В. ХРУНИЧЕВА

Development of experimental (technology demonstration) models of a small spacecraft and nanosatellites for testing key technologies of multi-satellite space systems for observation of the Earth's surface and near-Earth space

OBJECTIVES OF THE PROGRAM ACTIVITY

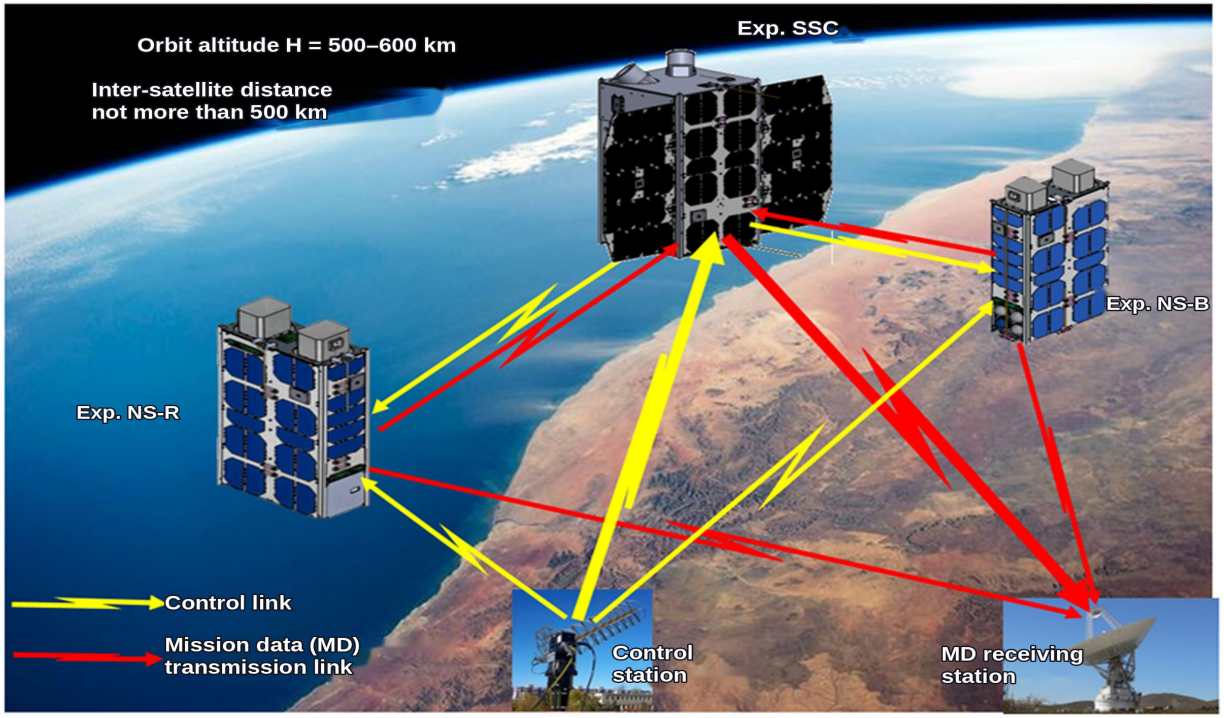
- development of technologies for creating micro- and nanosatellites as the basis for multi-satellite orbital constellations;
- preparation of joint scientific space experiments relevant to Russia and Belarus aimed at developing technologies of:
  - inter-satellite interaction;
  - improving the quality of Earth remote sensing systems;
  - near-Earth space monitoring;
  - solar activity monitoring for space weather forecasting.

RESULTS OF THE ACTIVITY

Experimental (technology demonstration) spacecraft ready for launch and in-orbit testing

MULTI-PURPOSE ORBITAL CONSTELLATION OF THE UNION STATE

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР ИМЕНИ М. В. ХРУНИЧЕВА



74

Conclusion

Analysis of current research on possible functioning variants of prospective MSC shows qualitative changes in the control technologies of both individual SC and the MSC as a whole. These changes are based on a substantial transformation and renewal of the composition, structures and potential capabilities of the hardware and software complexes that form the basis of the onboard systems (OBS) of the SC within the MSC.

The analysis shows that solving these MSC control problems requires a well-grounded solution of a number of fundamental and applied problems, including: problems of dynamic multi-criteria structural-functional synthesis and proactive control of the target application of an ERS MSC, as well as of the OBS of an individual SC and of the system onboard resources (SOR) of the MSC;

– problems of high dimensionality and non-linearity of the models describing the structure and functioning variants of the elements and subsystems of ERS SC OBS, the ERS OC and the GCC;

– problems of constructively taking into account, in the models, the multi-criteria evaluation, analysis and forecasting of reliability, survivability and disaster resilience indicators of ERS SC OBS (onboard equipment), MSC application efficiency indicators, and the generation of recommendations (including control actions) ensuring guaranteed recovery of operability under possible malfunctions, failures, emergencies and uncertainty factors associated with environmental impacts on individual SC, the MSC and ground control complexes;

– problems of multi-criteria optimization of structure-dynamics control programs for SC, the MSC and the GCC on multiple-model complexes;

– the problem of structural-functional synthesis of the multiple-model complex configuration;

– the problem of deep (integrative) harmonization of the methods, models and algorithms used in integrated modeling of SC, the MSC and the GCC;

– the problem of parametric and structural adaptation of the multiple-model complex describing the functioning of SC, the MSC and the GCC;

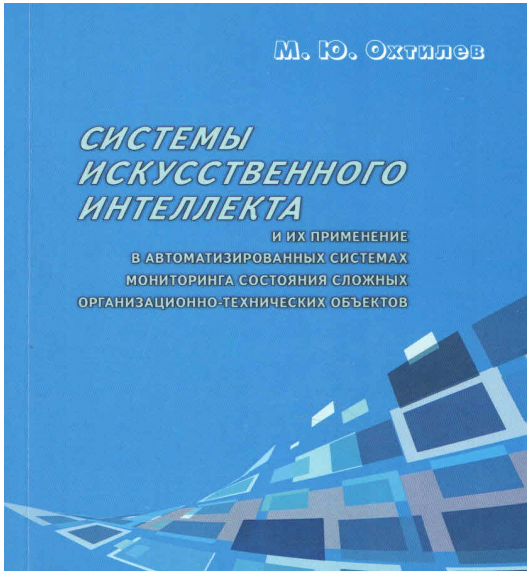
– the problem of verification and validation of the multiple-model complex;

– the problem of automating the integrated modeling of the functioning of SC, the MSC and the GCC. Solving all these scientific problems requires developing the corresponding methodological, methodical and technological foundations of the applied theory of proactive control of MSC structural dynamics.

The report presents the methodology and technologies of proactive control of space computing, including cloud, fog and edge space computing.


КВАЛИМЕТРИЯ МОДЕЛЕЙ И ПОЛИМОДЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ
Микони С. В., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.
КВАЛИМЕТРИЯ МОДЕЛЕЙ И ПОЛИМОДЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ
ОБЪЕКТ МОДЕЛИРОВАНИЯ
Созданные (изменение) модели
Изучение свойств объекта
Решение по модели
Среда моделирования
СУБЪЕКТ
Повторение эксперимента
Анализ результатов
Модель
Моделирование
Результат моделирования
2018

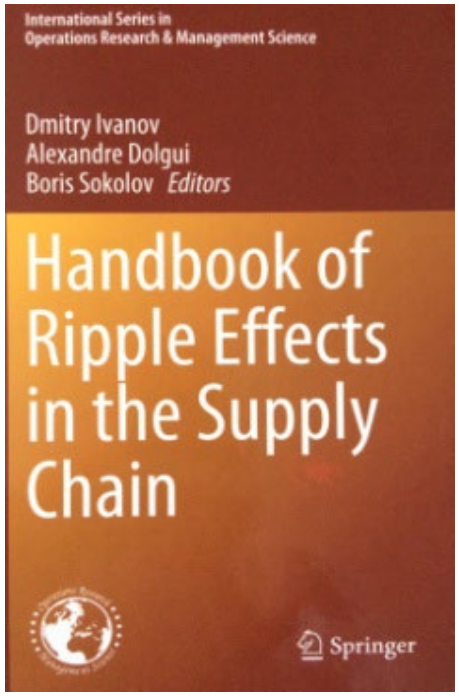

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ
состояние
перспективы применения
ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ
состояние • перспективы применения

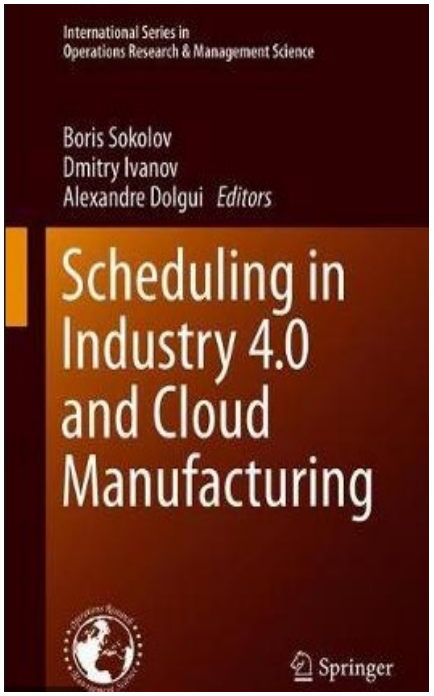

М. Ю. Охтилев
СИСТЕМЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ
В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ
МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ
ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

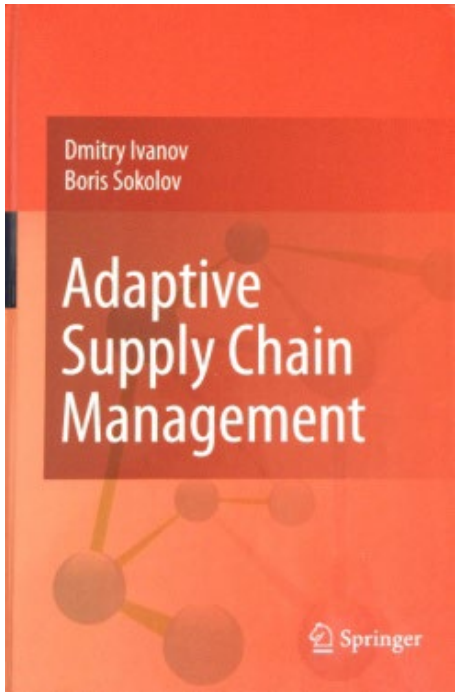

ИНФОРМАТИКА
М.Ю. ОХТИЛЕВ
Б.В. СОКОЛОВ
Р.М. ЮСУПОВ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ
СТРУКТУРНОЙ ДИНАМИКОЙ
СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ



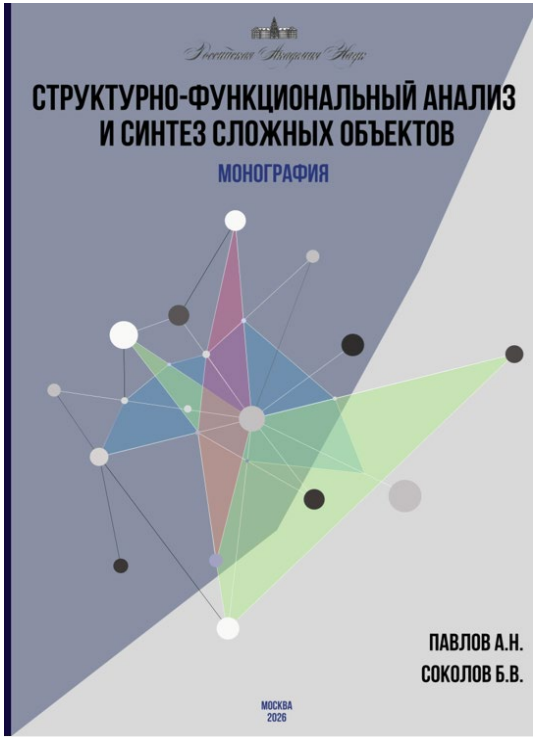



International Series in
Operations Research & Management Science
Dmitry Ivanov
Alexandre Dolgui
Boris Sokolov Editors
Handbook of Ripple Effects in the Supply Chain
Springer


International Series in
Operations Research & Management Science
Boris Sokolov
Dmitry Ivanov
Alexandre Dolgui Editors
Scheduling in Industry 4.0 and Cloud Manufacturing
Springer


Dmitry Ivanov
Boris Sokolov
Adaptive Supply Chain Management
Springer

Published monographs







THANK YOU FOR YOUR ATTENTION!

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS)

(812) 328-33-11, 328-01-03

http://www.spcras.ru, http://litsam.ru

E-mail: info@spcras.ru, sokol@iias.spb.su

США: США занимают безусловное лидерство как в теоретической проработке, так и в натурно-экспериментальной реализации концепции Space Edge Computing за счет синергии программ DARPA, Space Development Agency (SDA), NASA, USSF и частного сектора (SpaceX, Microsoft, Planet Labs, Amazon, Loft Orbital). Широкое применение космических и радиационно-стойких: Xilinx/AMD Versal AI Core Space-Grade (XQRACAP), систем на базе NVIDIA Jetson AGX Orin Industrial (в термостатированных и защищенных отсеках малых КА), нейроморфных чипов Intel Loihi (эксперименты AFRL по сверхнизко потребляющему распознаванию), специализированных VPU.

Модельно-алгоритмический базис: совместное планирование «Сенсор — Вычисления — Канал» - задача формулируется как задача смешанно-целочисленное нелинейное программирования с многокритериальной оптимизацией по Парето, децентрализованные алгоритмы распределения задач, Обучение с подкреплением (MARL): Применение алгоритмов MAPPO (Multi-Agent Proximal Policy Optimization) и MADDPG (Multi-Agent Deep Deterministic Policy Gradient) для адаптивного управления углами ориентации КА и переконфигурации вычислительных очередей при обнаружении стохастических явлений (например, внезапный прорыв облачности над районом интереса, обнаружение факела старта ракеты).

.

КНР: Стратегическая ставка на масштаб и коллаборативное машинное обучение. Орбитальная группировка Tiansuan отрабатывает концепцию «космической периферийной фабрики знаний». Исследования сосредоточены на алгоритмах Space-FEL (Federated Edge Learning): КА агрегируют опыт распознавания наземных объектов в различных метеоусловиях, обмениваются весами глубоких нейросетей по МСС и проводят дообучение моделей без сброса гигабайтных массивов исходных изображений на наземные комплексы. Модельно-алгоритмический базис: теоретико-графовые модели динамических сетей: широко применяется аппарат Time-Expanded Graphs (TEG) и периодических время-вариантных графов (Time-Varying Graphs, TVG), коллаборативное периферийное обучение, нейроморфные бортовые вычисления: внедрение спайковых нейронных сетей (SNN) в алгоритмы проактивного обнаружения изменений (Change Detection) на матрицах SAR и оптических сенсоров.

Великобритания и ЕС: Упор на верифицируемую надежность автономных систем и стандартизацию. Исследования ведутся преимущественно на платформах малых КА (-sat-1/2, OPSSAT). Ключевое достижение — создание строгих математических моделей Contact Graph Routing (CGR), учитывающих стохастическую природу радиолиний и прерывистый характер связности в условиях жестких энергетических дефицитов платформы CubeSat/SmallSat.

Российская Федерация: Фундаментальные теоретические школы и (ФИЦ ИУ РАН, НИИСИ РАН, ИПУ РАН, ИСИ РАН, РФЯЦ –ВНИИ ЭФ, СПб ФИЦ РАН, МГУ, СПбГУ, ГЭТИ, ГУАП, ВоенМех, МАИ, МВТУ, ВКА им. А.Ф. Можайского, СПбТУ, ТГТУ, ВПК) занимает лидирующие позиции в мире по формализации и решении проблем динамического многокритериального структурно-функционального синтеза и управления развития сложными техническими системами.
Отечественные модели полиэдральной оптимизации и динамических графов превосходят многие зарубежные аналоги по глубине учета системных связей.
Однако переход от теоретических моделей к физической реализации на орбите *сдерживается спецификой компонентной базы.*
Ответом на это ограничение стало развитие направления *легковесных, квазианалитических проекционно-операторных алгоритмов и целочисленных эвристик, способных работать на вычислителях умеренной производительности*. ***Федеральный проект «Сфера***»: Системный проект развертывания МГ МКА. Заявлены требования по интеграции КА с национальной системой ретрансляции «Луч».
Бюро 1440: Наиболее динамично развивающаяся частная инициатива в РФ. В рамках миссий «Рассвет-1» и «Рассвет-2» в 2023–2024 гг. осуществлена первая в истории РФ успешная передача данных по отечественным межспутниковым лазерным каналам связи (OISL) на дистанциях сотни километров, а также тестирование абонентской связи 5G NTN. Это формирует физическую инфраструктуру для последующего развертывания распределенного орбитального облака.