



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

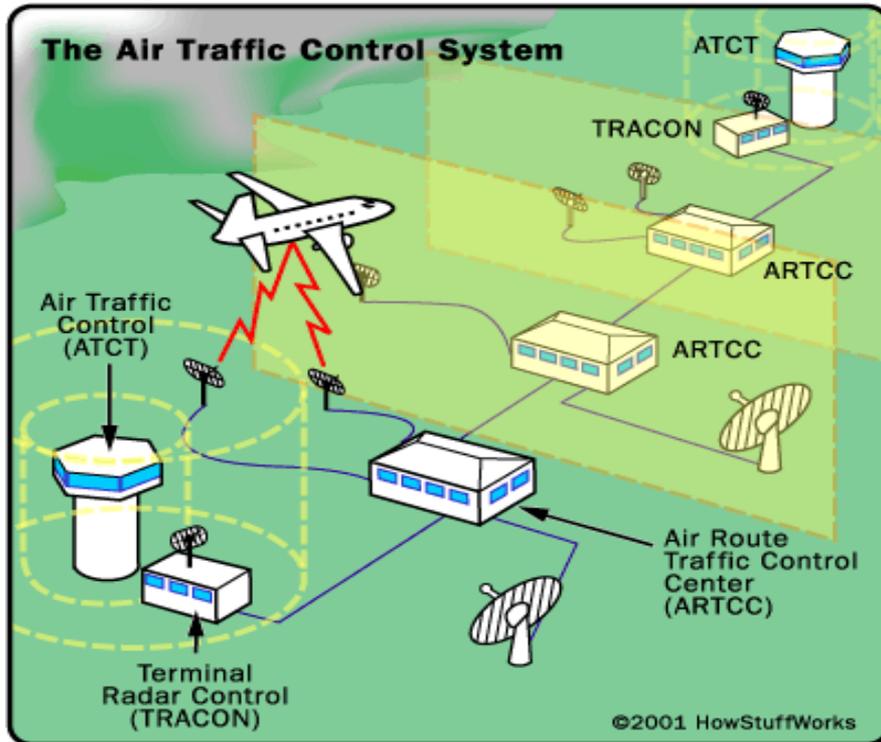
«Методы регулирования потоков воздушного движения»

Габейдулин Р.Х., аспирант 1-го года обучения,
Аспирантская школа компьютерных наук

Научный руководитель
Доцент, к.т.н. Зыков С.В.

1. Организация воздушного движения
2. Регулирование потоков ВД в США и Европе
3. Актуальность задачи регулирования потоков ВД для РФ
4. Цели и задачи исследований

Управление воздушным движением





Структура воздушного пространства РФ





Управление воздушным движением



Цели

Средства достижения

1. Помощь системе УВД

- Недопущение перегрузок диспетчера
- Обеспечение равномерного использования ВП

2. Минимизация потерь авиаперевозчиков из-за ограниченной пропускной способности системы УВД

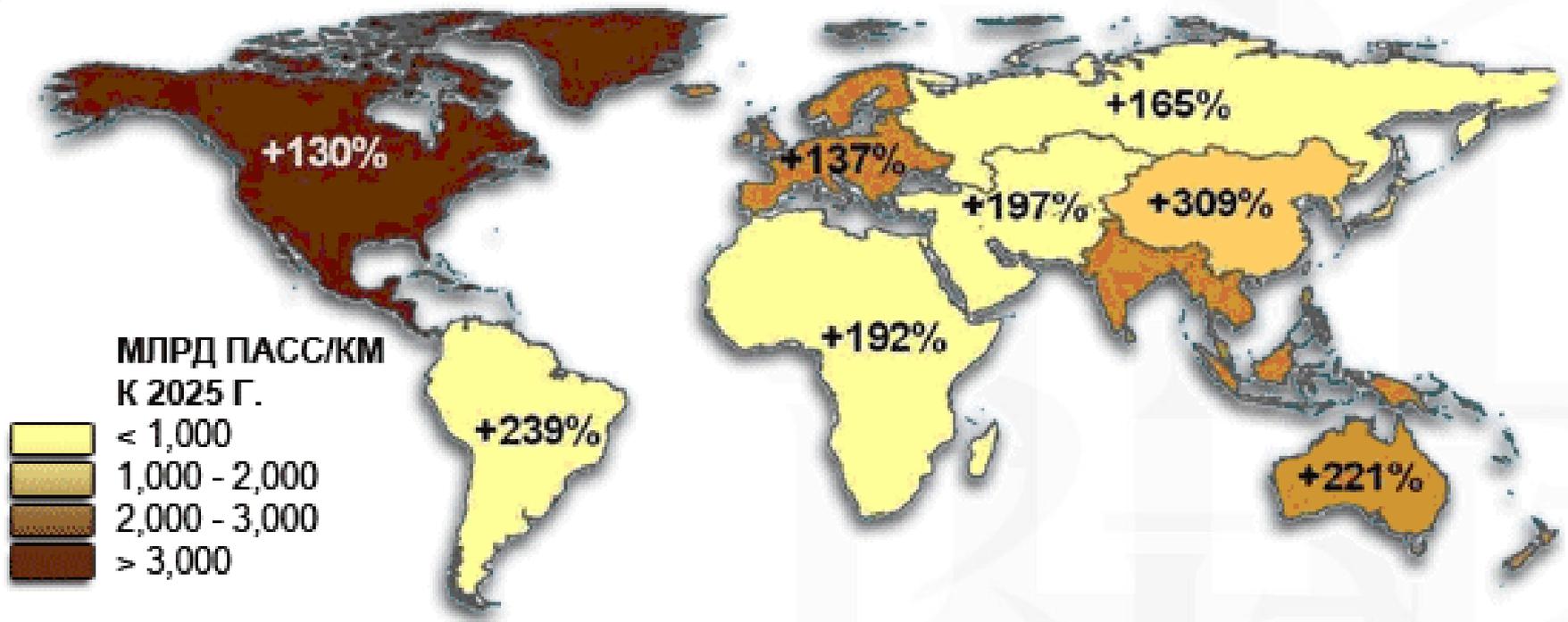
- Оптимизация использования имеющихся ресурсов системы УВД
- Минимизация потерь из-за перегрузок (задержки, увеличение длины маршрута, неоптимальные эшелоны)



Организация потоков воздушного движения



Рост интенсивности воздушного движения



- Координирует работу **Командный центр системы УВД** в Вашингтоне
- Ставка на **системность** принимаемых решений
- Во главе – принцип **совместного принятия решения**
- Конференц-связь каждые 2 часа с представителями диспетчеров, авиакомпаний, военных, служб Канады для планирования работ на 6 часов вперед
- Цель: совместно найти **самые мягкие** решения
- Максимальное распространение имеющейся информации (задержки, погодные условия)





Специфика воздушного движения в США

Специфика воздушного движения:

- Основные перегрузки в крупных аэропортах, а не в секторах управления
- Частое ухудшение погодных условий, связанных с грозами, ураганами, торнадо



Меры регулирования:

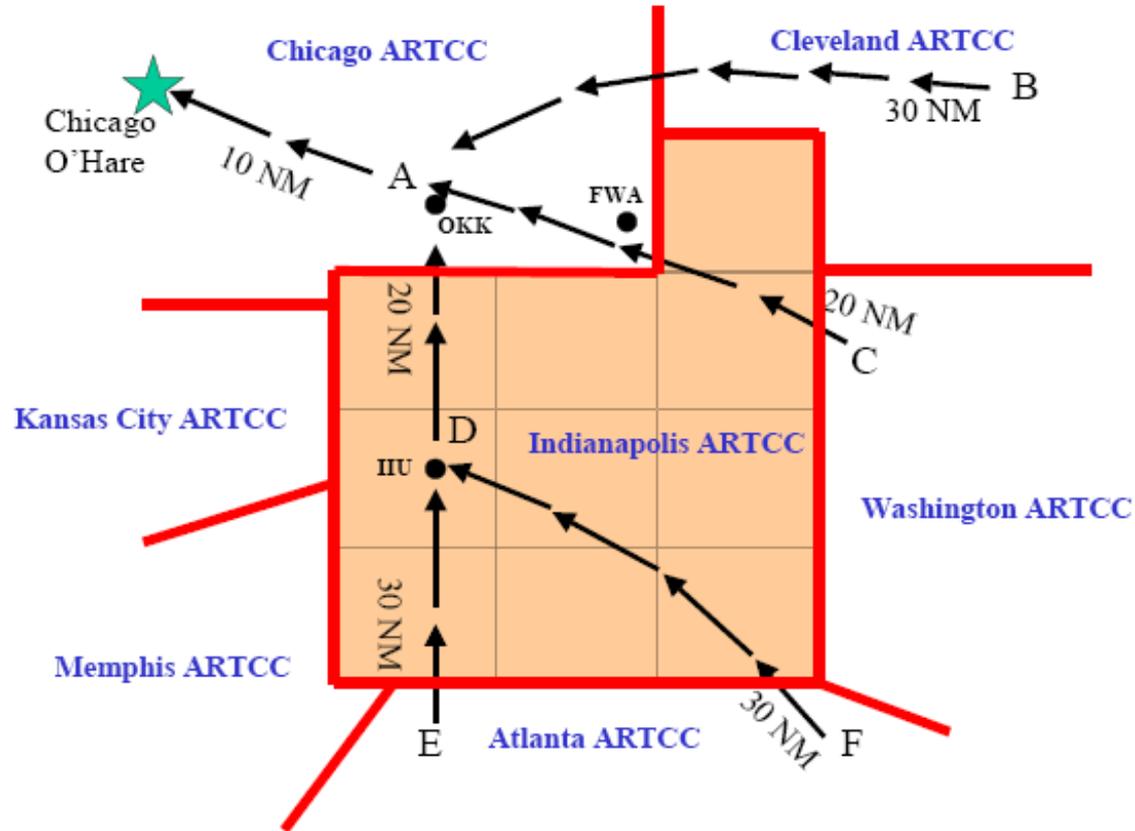
- назначение интервала в потоке (Miles in Trail - MIT);
- ограничения по высоте полета (capping, tunnelling);
- изменения маршрутов движения;
- задержки вылета;
- ****





Miles in Trail. США

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ





Miles in Trail. США

- Наиболее часто применяемая мера
- Двойное влияние на загруженность диспетчера:
 - оказывает содействие лучшей организации потоков,
 - НО может спровоцировать повышение рабочей нагрузки из-за необходимости задать последовательность воздушных судов



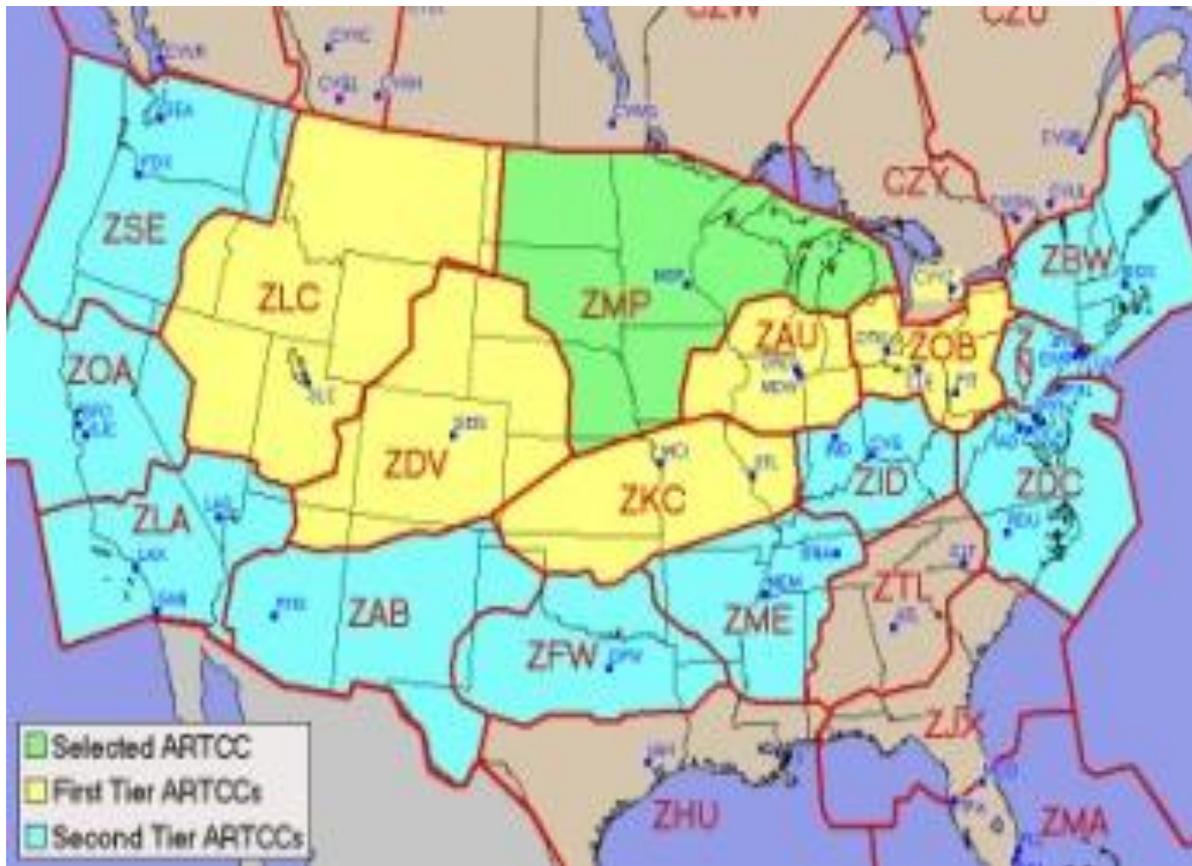


Ground Delay Program. Задержки вылета. США

- Когда MIT или ограничения по высоте невозможны
- Цель – перенести задержки в воздухе на землю
- Служат для разгрузки аэропортов
- Задержки рассчитываются исходя из перегрузки аэропорта прилёта
- Подвергаются задержкам не все рейсы, а только вылетающие из аэропортов, находящихся в **определенной зоне**



- По радиусу(в зависимости от степени перегрузки)
- По зоне:





Ground Delay Program. Задержки вылета. США

- Задержки считаются **один раз на весь период перегрузки аэропорта**
- Если рейс заявился позже расчета, то он получит задержку вылета, **среднюю** среди прилетающих в этот же аэропорт в 15-минутный интервал с ним
- Периодически производится поиск **неиспользованных слотов прилета**, чтобы уплотнить трафик и эффективнее использовать пропускную способность аэропорта



ZDC Center Monitor

Functions Help

Time Range 3.00 hours. 2 3 4 5 6 NAS Updated: 2029

Show if alerted in next: 2.25 hours (Time Limit)

Show if sector type is: Low High Super High

ZDC32	17/17	14	10	12	15	16	17	13	6	12	16	14	11
ZDC52	17/17	9	8	10	9	7	12	8	5	2	6	14	15
ZDC72	18/18	11	11	19	21	17	25	18	17	12	14	15	21
ZDC16	15/15	19	9	7	9	7	13	12	9	9	15	12	14
ZDC36	16/16	8	6	10	10	13	12	14	7	10	10	12	10
ZDC37	12/12	8	10	9	10	13	13	8	9	8	8	10	11
ZDC03	16/16	6	14	14	16	17	15	11	21	17	19	14	13
ZDC04	19/19	9	14	16	18	17	14	16	15	14	12	16	16
ZDC34	16/16	7	8	7	9	13	10	8	5	7	7	4	5
ZDC50	18/18	18	27	31	29	23	22	19	18	18	21	15	18
ZDC54	16/16	10	9	15	12	8	5	10	8	2	6	5	9
ZDC09	18/18	21	19	12	23	22	17	20	20	16	9	14	14
ZDC35	18/18	13	11	2	6	13	14	13	5	5	5	5	2
ZDC38	16/16	10	12	3	5	9	8	10	8	6	6	10	11
ZDC10	15/15	5	6	5	4	6	6	8	7	8	4	5	6
ZDC12	16/16	13	12	11	7	7	11	14	14	9	10	12	17
ZDC18	12/12	9	10	11	11	7	7	7	14	14	8	7	12
ZDC19	15/15	8	13	13	14	6	8	11	13	13	15	10	12
ZDC58	15/15	10	14	13	10	10	12	12	11	8	2	9	9
ZDC59	16/16	12	13	18	19	17	7	8	11	8	6	14	12
	MAP	2015	2030	2045	2100	2115	2130	2145	2200	2215	2230	2245	2300



- Зеленый: **все в порядке** (число ВС меньше пропускной способности)
- Желтый: **нужен контроль** (число ВС больше пропускной способности, но если считать только уже взлетевшие среди них, то их меньше пропускной способности)
- Красный: **нужно вводить меры** (число ВС больше пропускной способности, даже без учета невзлетевших)

- Европейская организация по безопасности воздушной навигации, **Eurocontrol**
- **Центр организации потоков CFMU, Network Manager**
- В каждом центре УВД есть **пункт организации потоков** – глаза и уши центра
- Всю информацию выкладывают на интернет-портал
- Телеконференция раз в день для согласования мер регулирования – **совместное принятие решения**



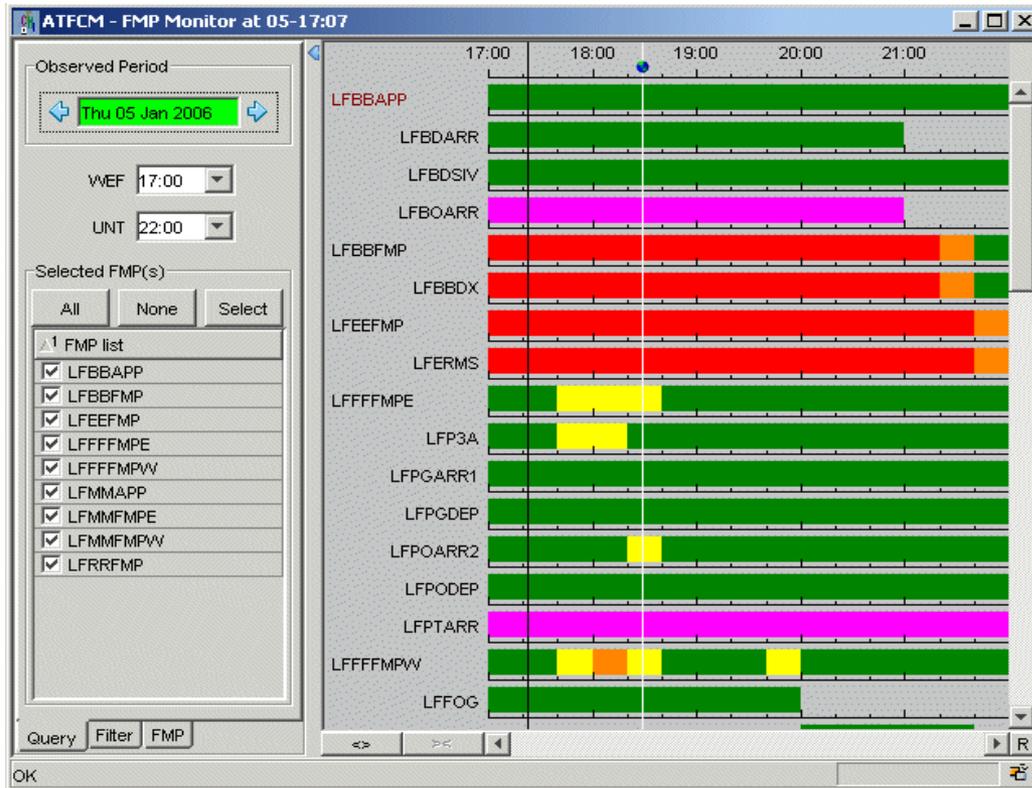
- Проблемы в основном с перегрузкой секторов
- Регулирование осуществляется в основном **задержками вылета**
- Процедура Miles-in-Trail в Европе совсем не применяется





Организация потоков воздушного движения. Европа

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



- Процедура CASA (computer assisted slot allocation) – простой эвристический алгоритм
- Принцип **First Planned First Served**
- Перегруженный временной интервал (час) разбивается на маленькие слоты в соответствии со значением пропускной способности. Дальше эти слоты последовательно заполняются рейсами. Каждому рейсу дается предварительный слот в соответствии с его плановым временем входа в сектор: если слот свободен, он назначается рейсу; если этот слот занят другим рейсом, но у него время входа по плану позже, то новый рейс забирает слот себе, а другой рейс сдвигается в соседний слот, там проводится та же проверка.



Недостатки:

- точечное решение проблемы без анализа последствий;
- неоптимальное решение;
- не учитывается приоритет рейса (государственные полеты, медицинские службы, МЧС)



SESAR

- Увеличение в 3 раза пропускной способности воздушного пространства;
- Снижение в 2 раза стоимости аэронавигационного обслуживания;
- 10-кратное повышение безопасности полета;
- Уменьшение влияния на окружающую среду (шумы, загрязнение окружающей среды).
На один полет - уменьшение на 10%;
- Повышение эффективности полетов от перрона до перрона;
- Создание рабочих мест для 200 тысяч высококвалифицированных специалистов.

NextGen

- Увеличение в 3 раза пропускной способности воздушного пространства;
- Обеспечение возможности 2,5-кратного увеличения пассажиропотока;
- Уменьшение времени задержек обслуживания в аэропортах на 30%;
- Снижение стоимости аэронавигационного обслуживания;
- Повышение безопасности полетов;
- Уменьшение влияния на окружающую среду (шумы, загрязнение окружающей среды);
- Повышение эффективности полетов «От края до края»;
- Уменьшение влияния погодных явлений на 95%.

- AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference
- ATM R&D Seminar
- SESAR Innovation Days
- Ежегодно появляется много работ, связанных с регулированием потоков воздушного движения

- Начало исследований - в 1990-х гг. в США
- Каждый год выходят всё новые работы, интерес к теме только возрастает
- Первые работы:
 - Задача задержек на земле для **одного** аэропорта 1987-1994
 - Задача задержек на земле для **нескольких** аэропортов 1994
 - Проблема регулирования потоков воздушного движения с учетом пропускной способности **секторов** 1998

Задача задержек на земле для одного аэропорта:

- A. Odoni, “The Flow Management Problem in Air Traffic Control,” *Flow Control of Congested Networks*, pp. 269–288, 1987
- A. Mukherjee and M. Hansen, “A Dynamic Stochastic Model for the Single Airport Ground Holding Problem,” *Transportation Science*, vol. 41, no. 4, pp. 444–456, Nov. 2007
- O. Richetta and A. R. Odoni, “Dynamic Solution to the Ground-Holding Problem in Air Traffic Control» *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 28, no. 3, pp. 167–185, May 1994

Задача задержек на земле для **нескольких** Аэропортов:

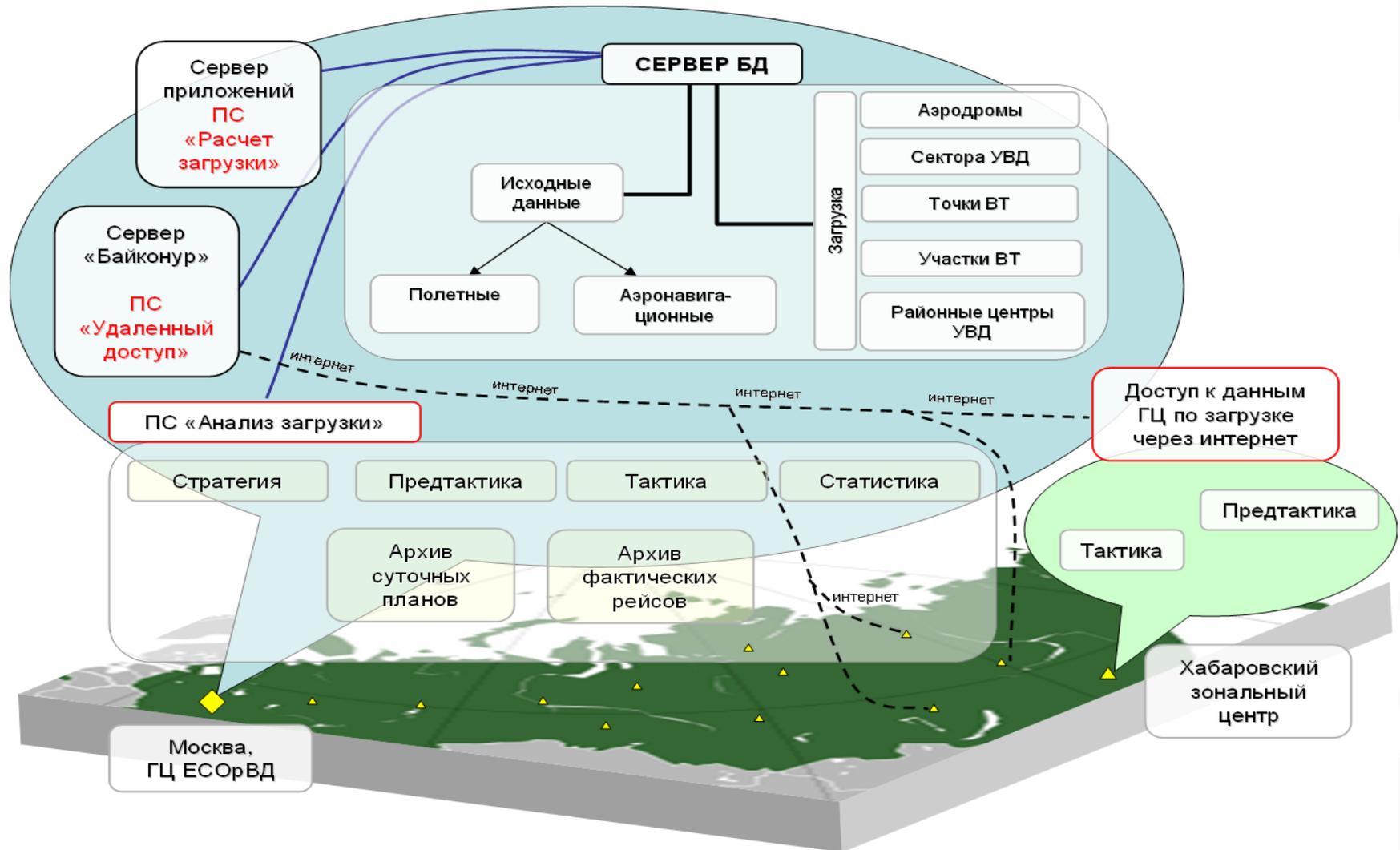
- P. Vranas, D. Bertsimas, and A. Odoni, “The Multi-Airport Ground-Holding Problem in Air Traffic Control,” *Operations Research*, vol. 42, no. 2, pp. 249–261, 1994

Проблема регулирования потоков с учетом пропускной способности **секторов**:

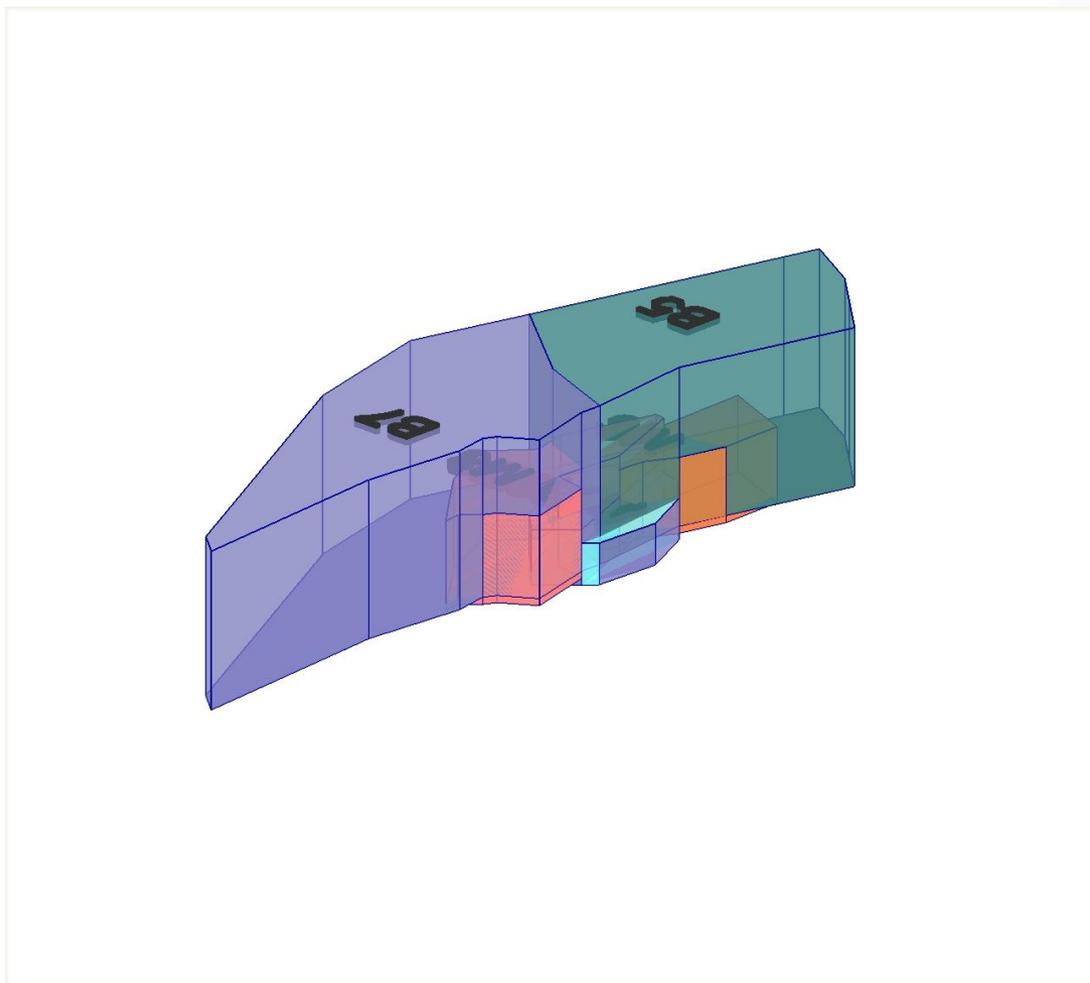
- D. Bertsimas and S. S. Patterson, “The Air Traffic Flow Management Problem with Enroute Capacities,” *Operations Research*, vol. 46, no. 3, pp. 406–422, 1998.
- D. Bertsimas, G. Lulli, and a. Odoni, “An Integer Optimization Approach to Large-Scale Air Traffic Flow Management,” *Operations Research*, vol. 59, no. 1, pp. 211–227, Mar. 2011.

- В Российской Федерации не реализованы меры регулирования
- За организацию потоков в РФ отвечает Главный центр Единой системы Организации Воздушного движения, сейчас осуществляется только мониторинг и предупреждение диспетчерских служб о прогнозе превышения пропускной способности
- Проблемы с перегрузкой ложатся на плечи диспетчеров УВД

ПС автоматизированной системы планирования потоков воздушного движения Единой системы Организации Воздушного Движения РФ

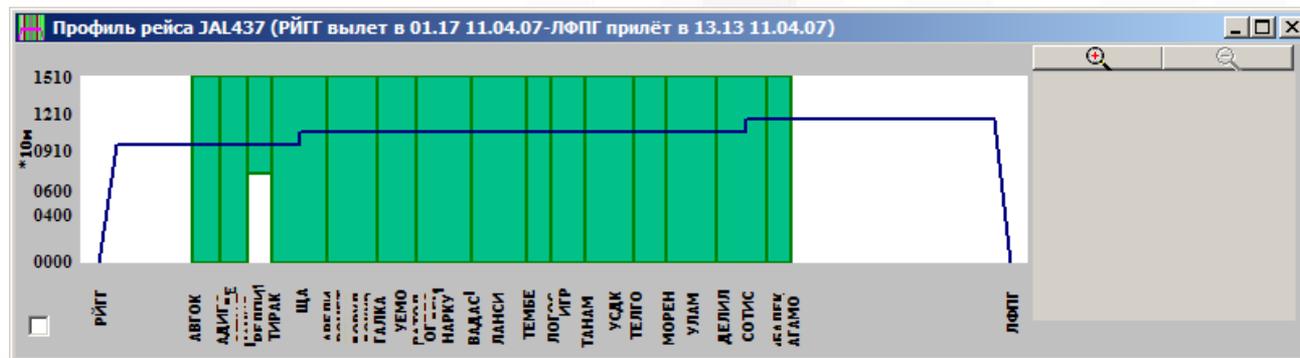


Модель представления секторов УВД в базе данных Главного центра ЕС ОрВД

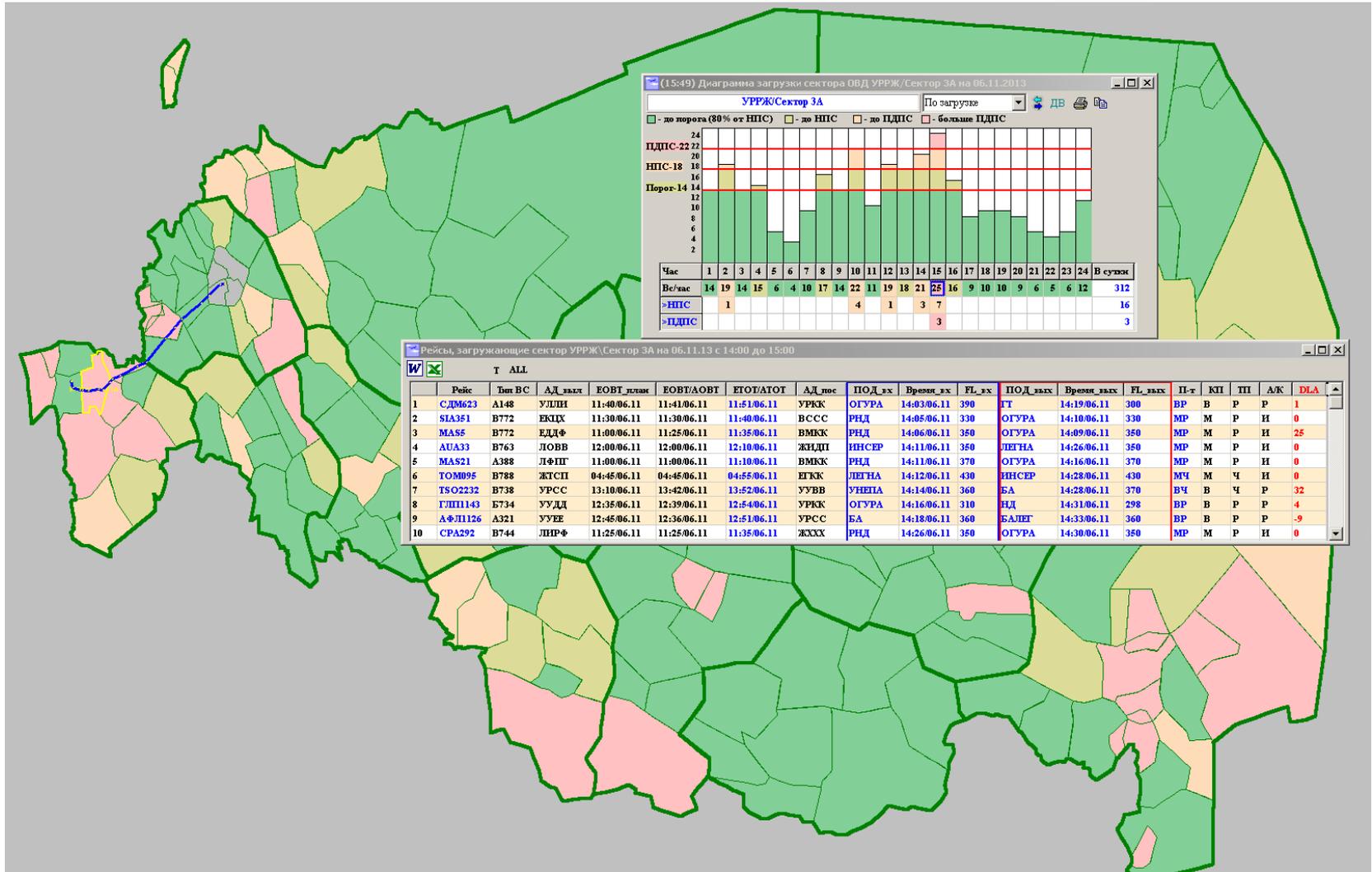


Модель представления траектории полета в в базе данных Главного центра ЕС ОрВД

- последовательность точек маршрута;
- скорости полета ВС на каждом участке;
- высоты полета ВС на каждом участке крейсерского полета, высоты в точках маршрута на этапах набора и снижения высоты;
- времена взлета и посадки, а также времена прохождения каждой точки на маршруте;
- весь полет состоит из трех этапов (фаз): набора высоты, крейсерского полета, снижения;
- полет на всех участках крейсерского полета происходит на постоянной высоте, соответствующей плану полета



Анализ загрузки элементов воздушного пространства



Постановка задачи расчета задержек вылета как задачи оптимизации

- Имеются исходный план полетов, данные по загрузке этим планом секторов управления и аэродромов и текущие данные по их пропускным способностям
- План полетов нарушает условия по загрузке ВП в определенных элементах ВП в определенные интервалы времени
- Определен набор рейсов из плана, время вылета которых можно изменять для обеспечения допустимой загрузки всех элементов ВП
- Необходимо определить рейсы, подвергаемые регулированию и определить величины задержки их вылета по сравнению с текущими заявленными данными такие, что:
 - цена регулирования минимальна
 - при реализации вычисленных мер все требования по выдерживанию пропускных способностей, которые имеется возможность выполнить, будут выполнены

Критерий задачи и ограничения

- Цена регулирования – суммарная задержка всех затронутых регулированием рейсов, где суммирование ведется по всем подвергнутым регулированию i -м рейсам :

$$Q = \sum c_i \Delta t_i$$

Δt_i – назначаемая задержка вылета относительно заявленного времени вылета для i -го рейса

c_i - весовой коэффициент, позволяющий учесть разную цену коррекции (учитывать приоритет рейсов, например)

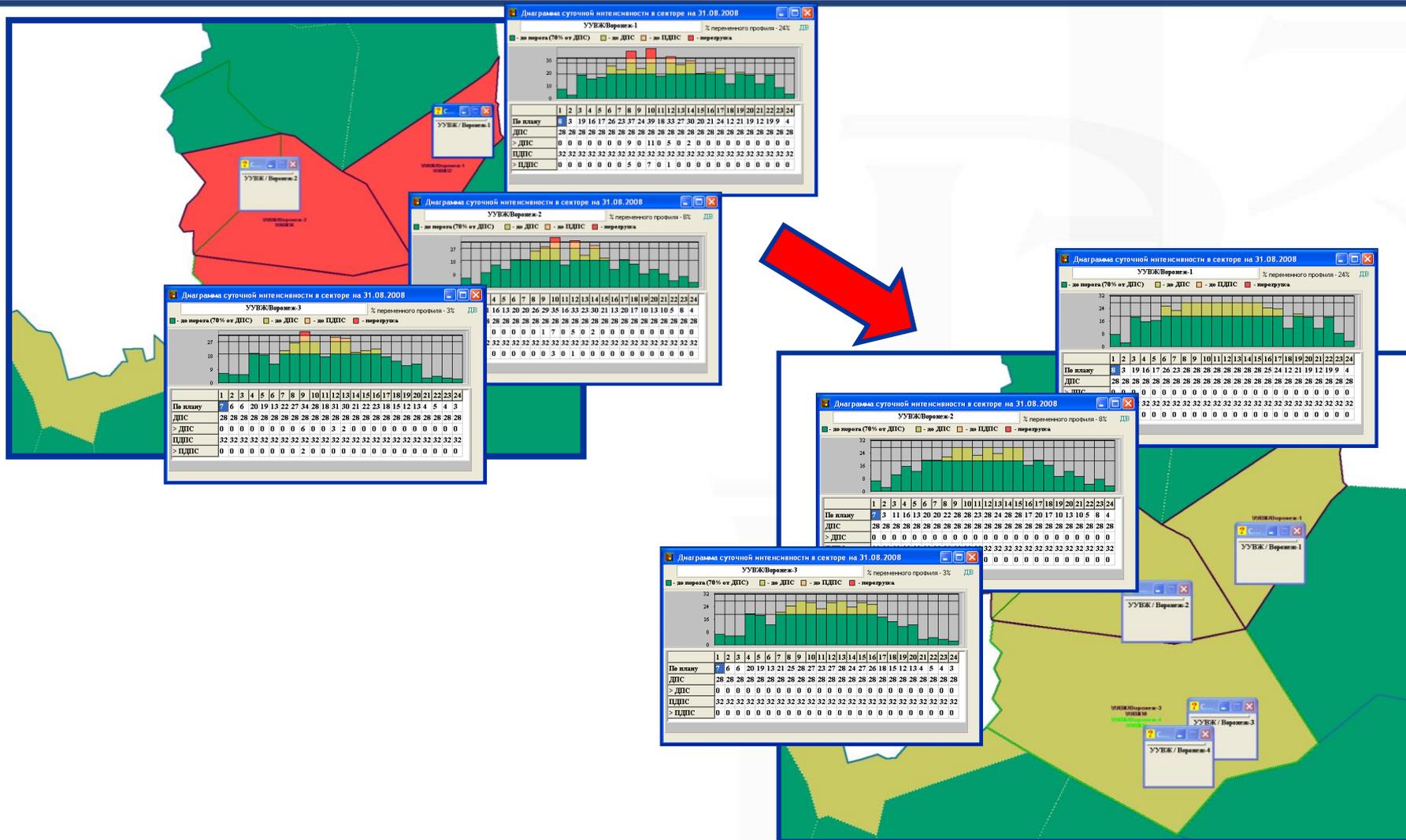
Ограничения

- $\Delta t_i > 0$ – допустима только задержка
- в любом секторе и в любой календарный интервал времени загрузка не должна быть больше величины, определяемой текущими данными по пропускной способности

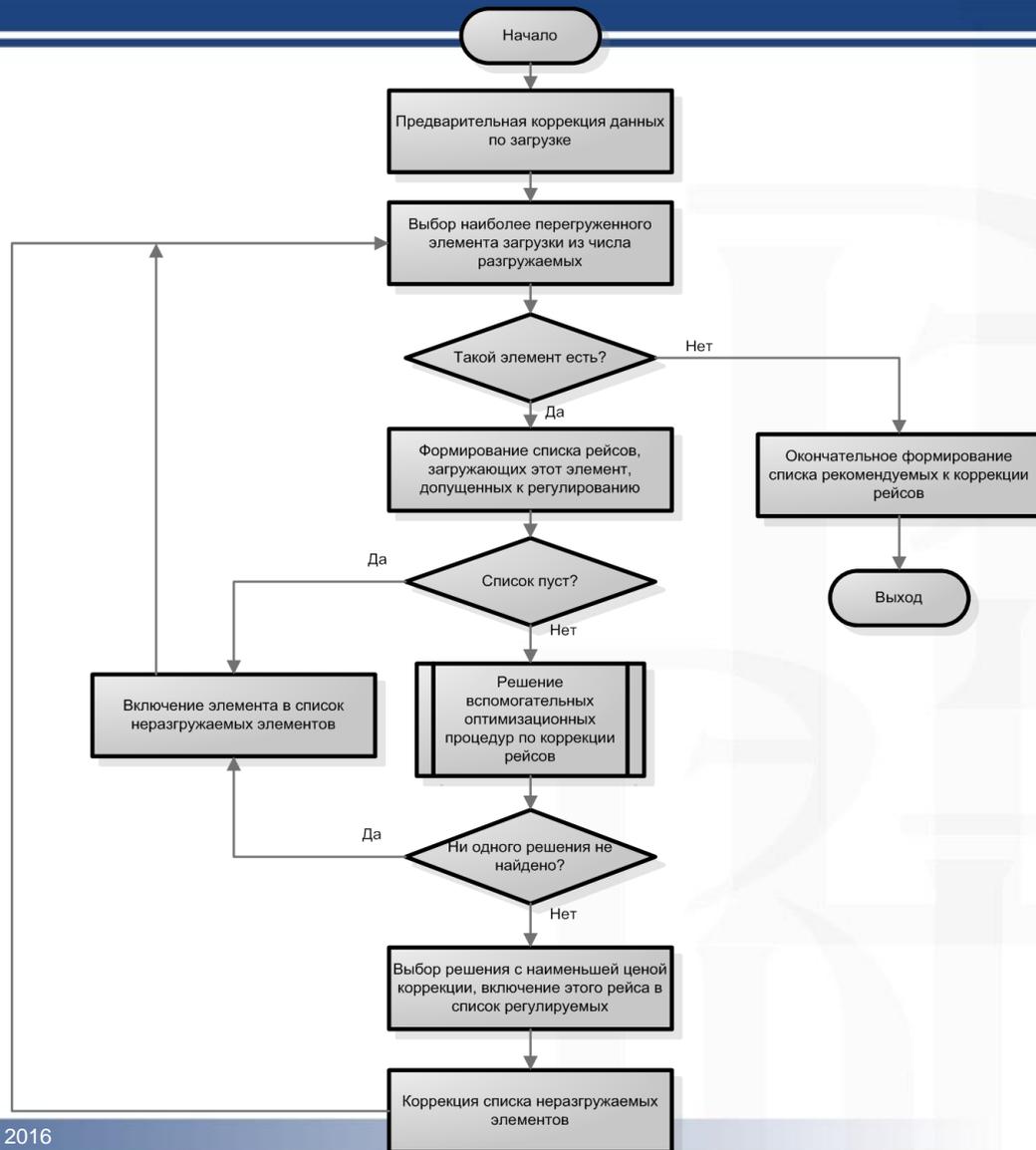
- Полетные данные по всем рейсам, загружающим сектора управления и аэродромы:
 - список полетов с общими данными
 - четырехмерные маршруты полетов, соответствующие текущим заявленным данным
- Загрузочные данные (почасовая загрузка элементов потоком ВД)
- Данные по геометрии, конфигурации и регламенту работы и пропускным способностям секторов
- Данные по пропускным способностям аэропортов

- Решение задачи - в ее декомпозиции
- Корректировка планов полетов ведется последовательно путем решения отдельных “локальных” оптимизационных задач.
- Цель решения локальной задачи - минимизация локального критерия «цены коррекции»
- Последовательность решения локальных задач выполняется от наиболее перегруженного элемента загрузки к последующему.

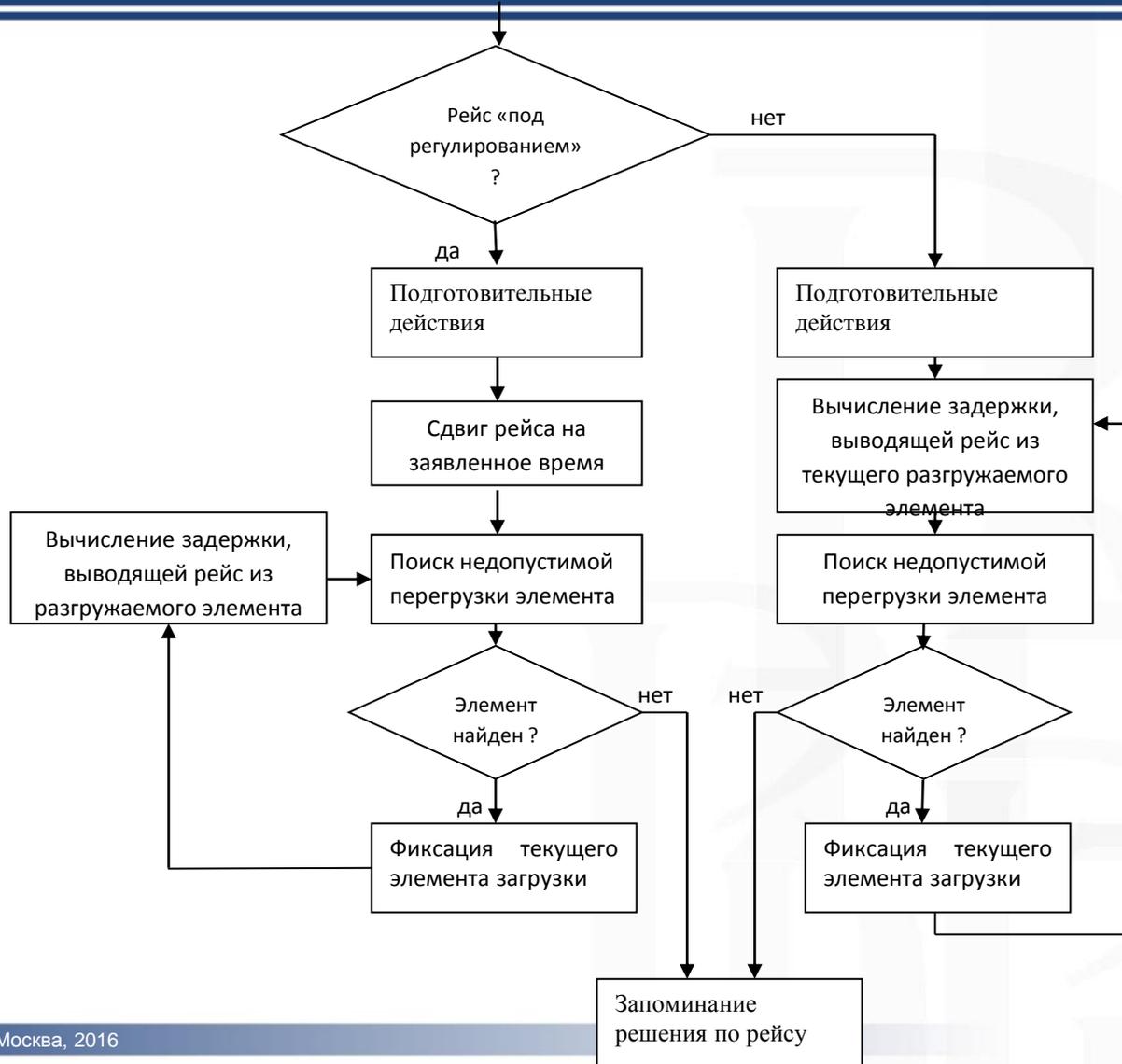
- Список полетов, по которым предлагается назначить, сохранить или изменить слот вылета с указанием назначаемых слотов вылета
- Данные по загрузке секторов, соответствующие назначаемым мерам



Упрощенная блок-схема алгоритма решения



Упрощенная блок-схема алгоритма решения. Вспомогательная процедура



- Алгоритм работает устойчиво; на основе текущей известной информации последовательно устраняет перегрузку.
- Принимаемые решения по задержкам системны - локальные изменения должны по крайней мере не ухудшить ситуацию в других элементах системы;
- Учитываются категории полётов;
- Меньшее количество рейсов подвергаются регулированию (по сравнению с CASA);
- Меньше суммарная задержка всех рейсов (по сравнению с CASA)
- Но плохая точность прогноза -> необязательные задержки
- Но не учитывается неопределенность прогноза

Цель и задачи диссертационного исследования

- **Целью** является разработка алгоритмов решения задачи регулирования потоков, учитывающих неопределенность прогноза, проведение исследований с помощью математического моделирования и практическое применение методов в Главном центре Единой системы Организации воздушного движения в РФ.
- **Задачи:**
 - 1) На основе системного анализа спроектировать и разработать агентную модель системы организации воздушного движения. Выработать показатели оценки различных методов регулирования потоков.
 - 2) Провести анализ предлагаемых в научных работах методов, алгоритмов регулирования потоков воздушного движения
 - 3) Поставить и решить задачу регулирования потоков воздушного движения в Российской Федерации с учетом неопределённости прогноза воздушной обстановки. Предложить ряд вычислительных алгоритмов.
 - 4) Реализовать рассмотренные методы регулирования потоков и интегрировать их в агентную модель, оценить показатели



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Спасибо за внимание!

101000, Россия, Москва, Мясницкая ул., д. 20

Тел.: (495) 621-7983, факс: (495) 628-7931

www.hse.ru