



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

«Задача назначения задержек вылетов воздушных судов при регулировании потоков воздушного движения с учетом неопределённости прогноза»

Габейдулин Р.Х., аспирант 2-го года обучения,
Аспирантская школа компьютерных наук

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



Предметная область



Математические модели и алгоритмы

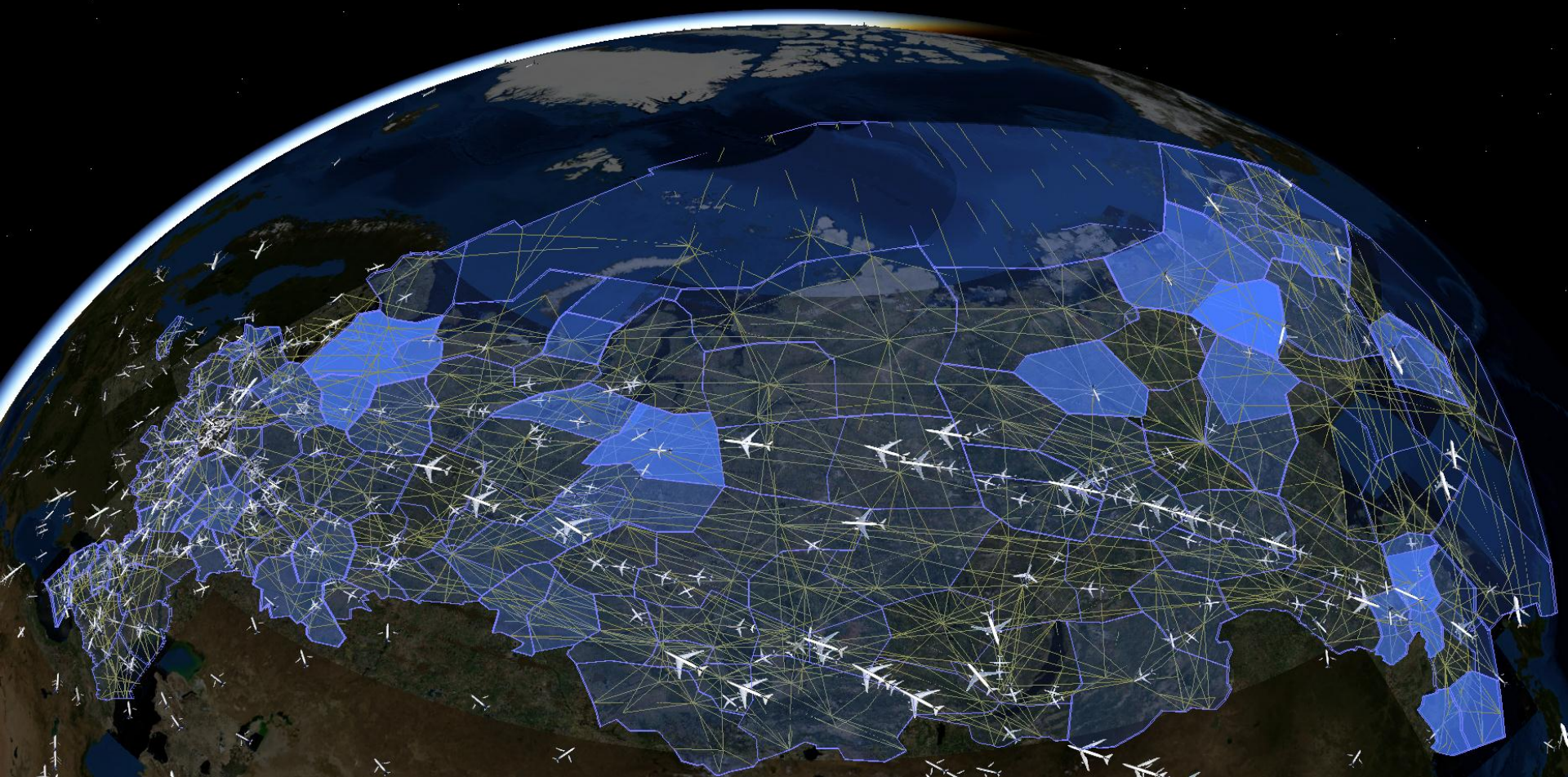


ОПВД в Российской Федерации



Неопределенность прогноза

Воздушное пространство РФ





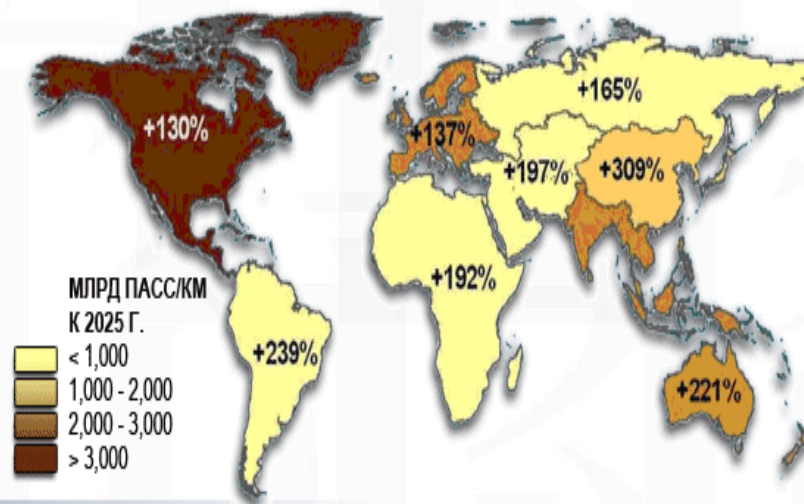
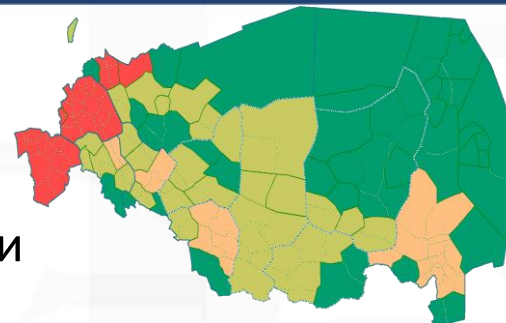
Пример плана полета

```
(FPL -ACF402 IN  
-EA30/H-S/C  
-EHAM0940  
-K0830F290 LEK28 LEK UA6 XMM/M078 F330  
UA6 PON URION CHW UA5 NTS DCT 4611N00412W  
DCT STG UA5 FTM FATIMIA  
-LPPT0230 LPPR  
-REG/FBVGA SEL/EJFL EET/LPPC0158 DOF/140908)
```


- Неуклонно растет интенсивность воздушного движения
- Растет перегруженность диспетчеров безопасности
- Снижается безопасность воздушного движения
- Растут издержки авиакомпаний



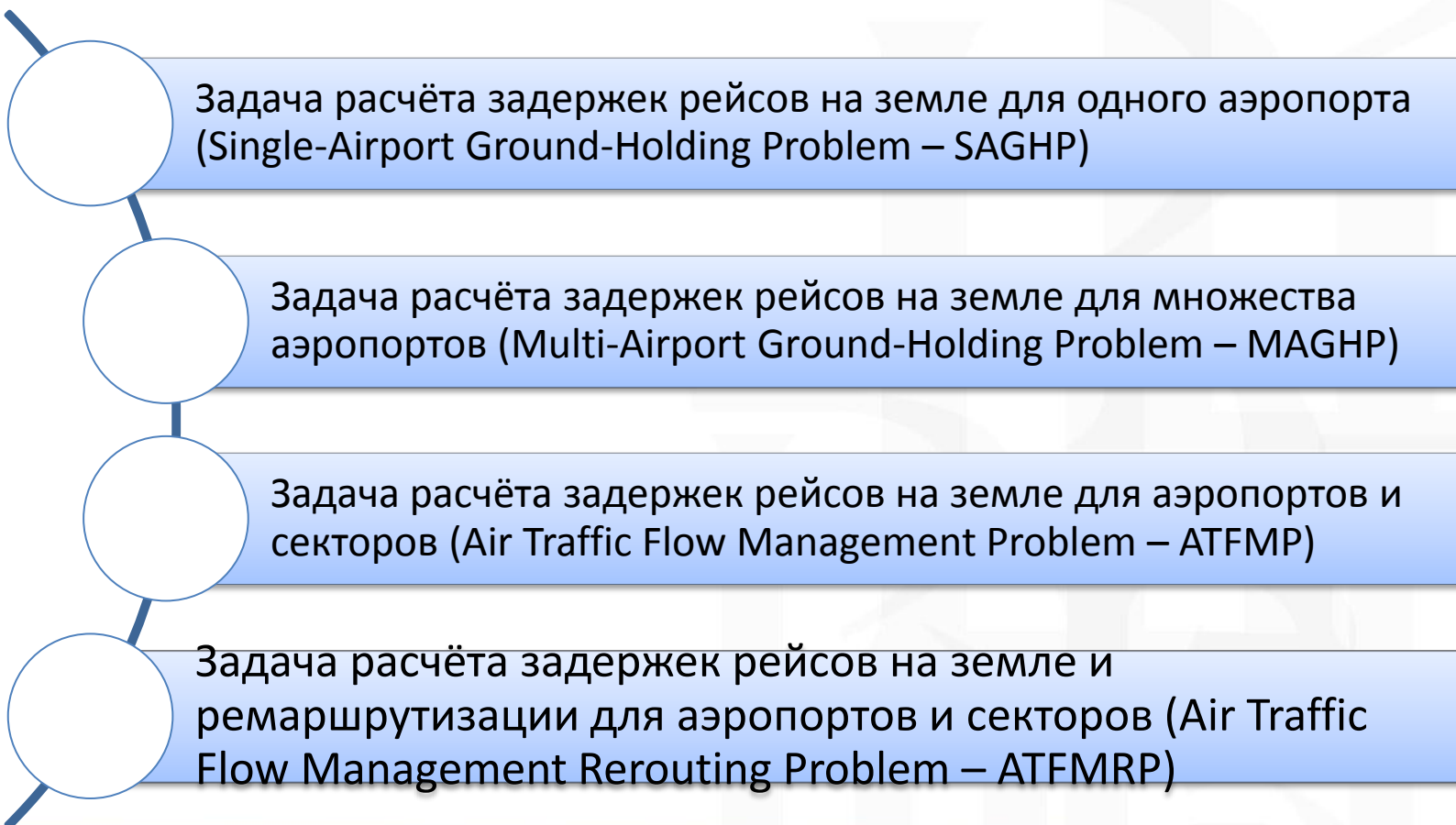
Необходимость регулирования потоков
воздушного движения



- Особенность ОПВД состоит в том, что её задача – управление всем совокупным трафиком в воздушном пространстве, а не отдельными полётами.
- ОПВД подразумевает управление воздушным движением на макроуровне.
- Задача УВД – “обеспечить безопасное расстояние между самолетами в каждом секторе”, а задача ОПВД – защитить самих диспетчеров УВД, упреждая их перегрузку.
- ОПВД устраняет дисбаланс между пропускной способностью и потребностью, который возникает из-за увеличенной потребности или из-за снижения пропускной способности

- В связи с неуклонным ростом воздушного движения задаче регулирования потоков ВД уделяется всё больше внимания как в авиационном сообществе, так и в научном мире.
- ОПВД - важная часть Исследовательских программ NextGen и SESAR
- С начала 1990-х с каждым годом растёт количество докладов и статей по тематике (ATM R&D Seminar, SESAR Innovation Days, IEEE Operational Research и др.)

По типу решаемой задачи



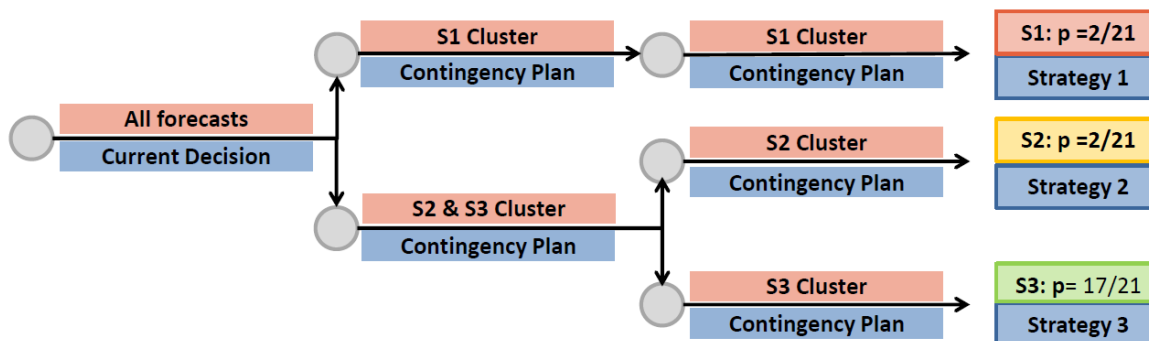
По учету неопределенности прогноза пропускной способности

- Детерминистские модели
- Стохастические модели

По учету изменений воздушной обстановки

- Статические модели
- Динамические модели

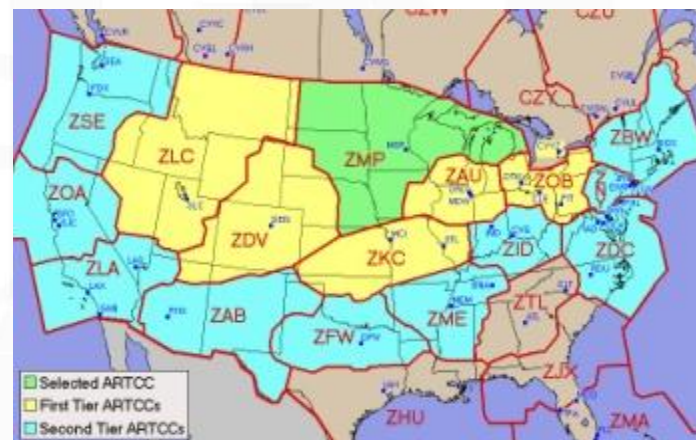
- Учитывают почти всегда только изменения пропускной способности из-за погодных условий
- неопределённость выражается посредством множества возможных сценариев, которые могут реализоваться
- сводят задачу к эквивалентной детерминистской модели



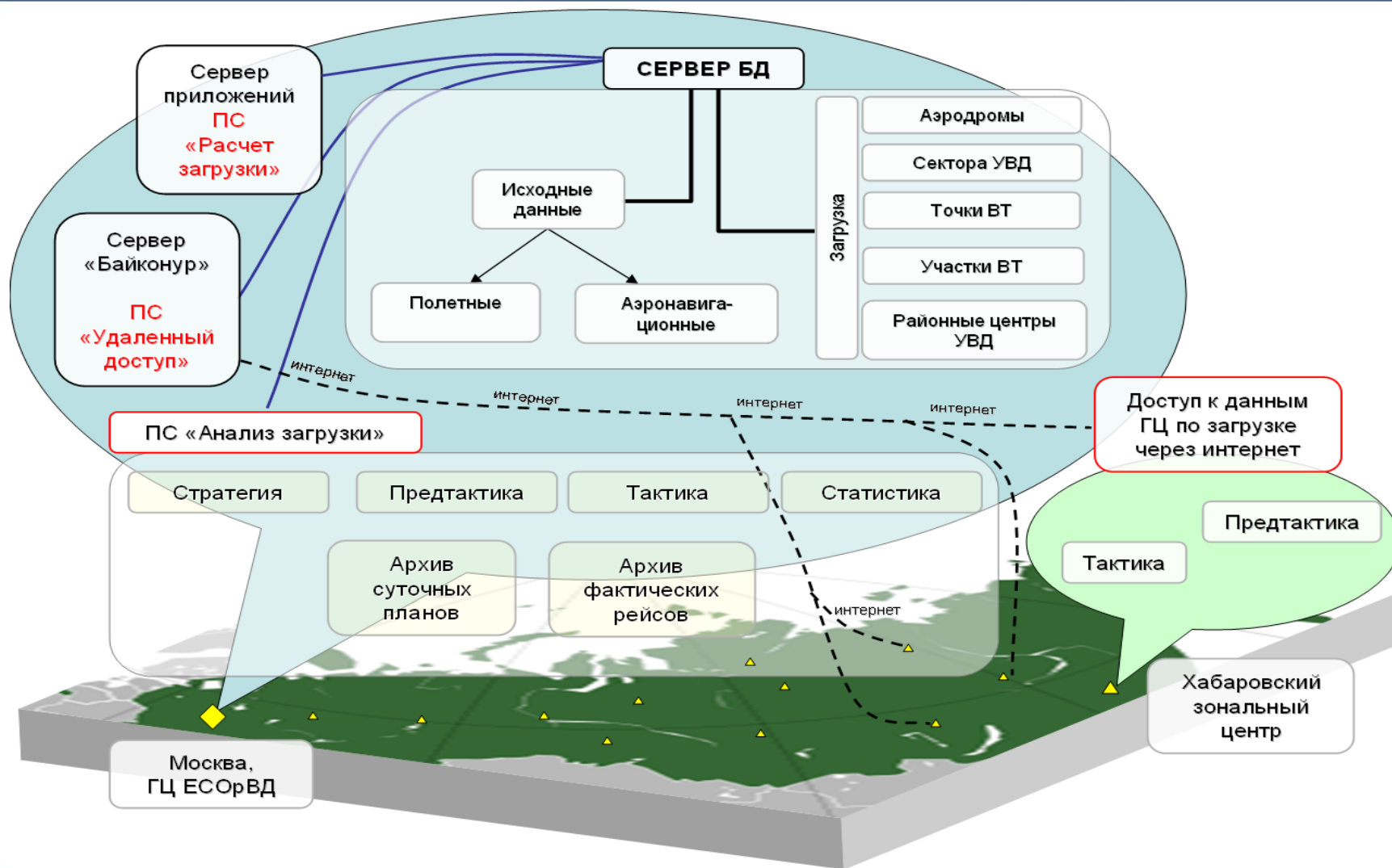
- Принципы «первым прибыл - первым обслужен» и «равный доступ к воздушному пространству» традиционно играют важную роль в процессах ОрВД
- В целях оптимизации процессов постепенно включаются принципы, основанные на оптимизационных алгоритмах, нарушающих порядок, но снижающих издержки
- Активно применяется концепция совместного принятия решений, при решении задачи используются предпочтения главных потребителей – авиакомпаний
- Эвристические быстрые и понятные алгоритмы

- В Европе CASA (принцип **First Planned First Served**)
- Перегруженный временной интервал (час) разбивается на маленькие слоты в соответствии со значением пропускной способности. Далее 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.

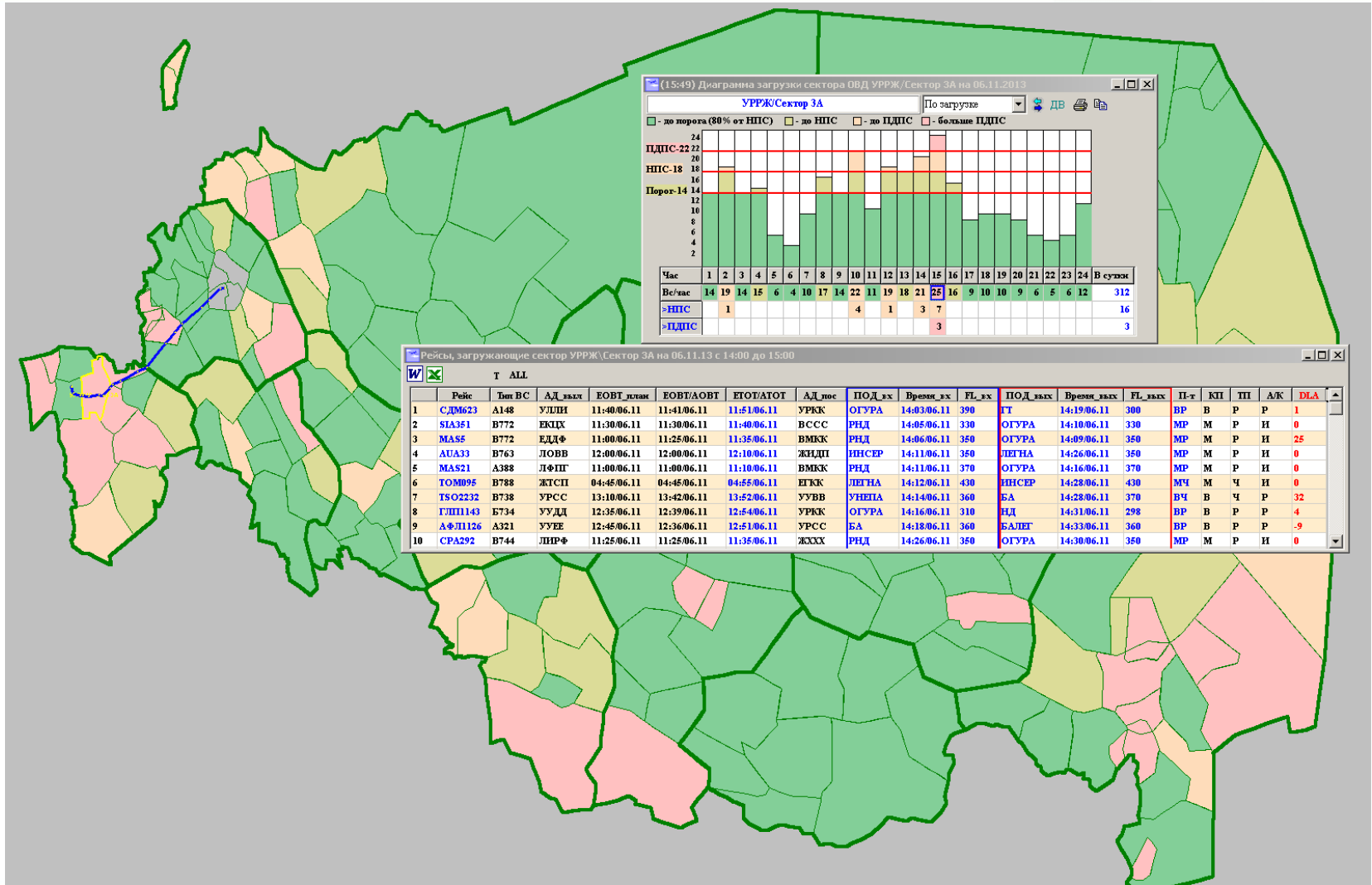
- В США - Программы задержек на земле
- «Первый по плану – первый обслужен», алгоритм распределения ресурсов Ration-by-Schedule (ранжирование по плану). Другой алгоритм, Compression, заполняет освобожденные слоты отмененными или задерживающимися рейсами



Автоматизированная система планирования потоков воздушного движения Единой системы Организации Воздушного Движения РФ



Анализ загрузки элементов воздушного пространства



Состояние вопроса в Российской Федерации

- 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

Жадный алгоритм назначения задержек вылета

- 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

Жадный алгоритм назначения задержек вылета

- 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)

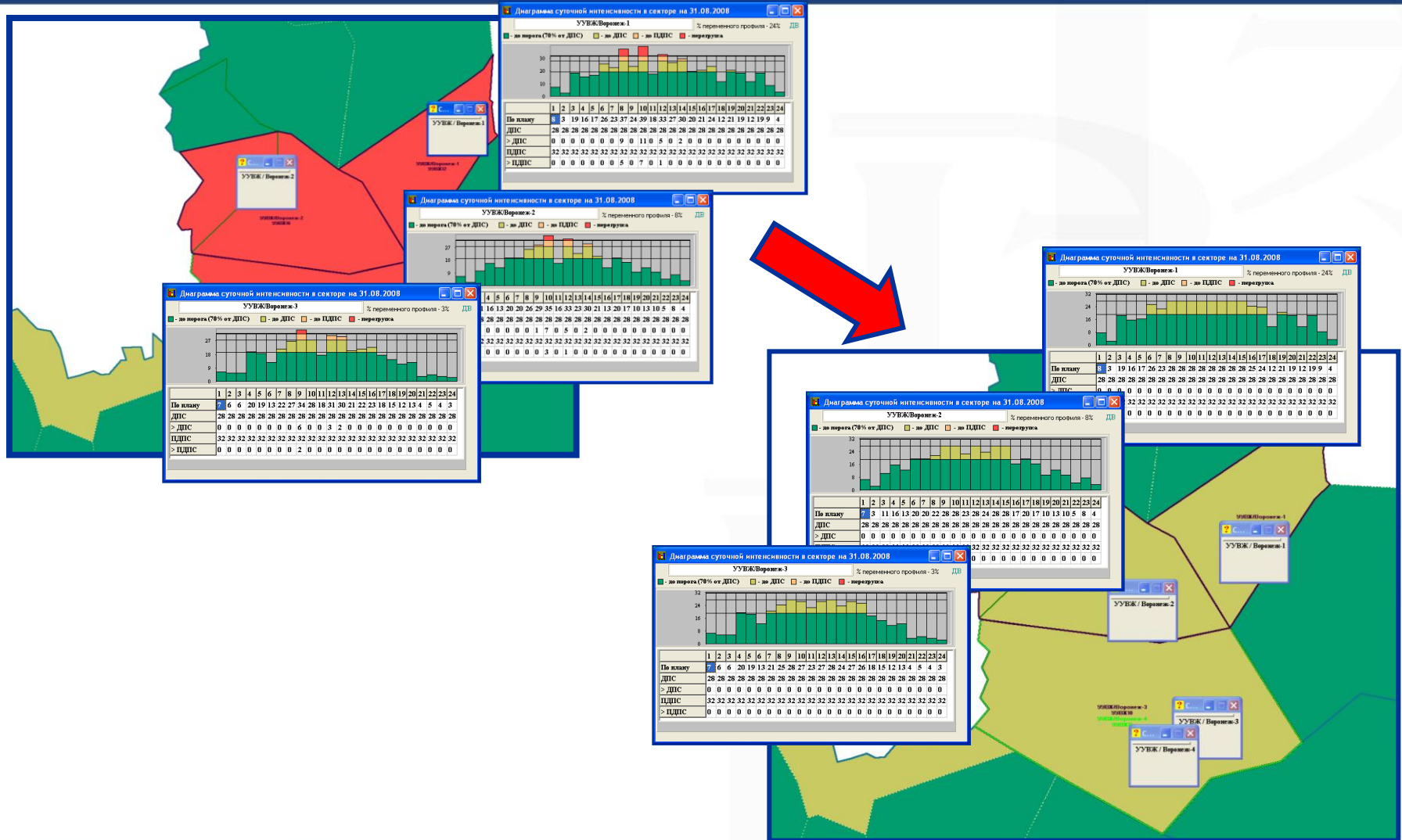
Ограничения

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

Жадный алгоритм назначения задержек вылета

- 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.

Жадный алгоритм назначения задержек вылета



Жадный алгоритм назначения задержек вылета

- 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

Каким образом учитывать неопределенность?

- Современная система ОПВД обеспечивает детерминированные прогнозы загрузки, суммируя полеты, у которых оценка времени прибытия или отправления (ETA или ETD) попадает внутрь изучаемого интервала без рассмотрения неопределенности (случайных ошибок) в ETA или ETD полетов.
- Неопределенность в рамках вероятностей снижения пропускной способности секторов из-за погодных условий
- Не исследована неточность прогноза из-за неопределенности в выполнении полета, в предсказании траектории
- А что если моделировать неопределенность траектории и на основе этого оценить неопределенность загрузки секторов?

Каким образом учитывать неопределенность?

- времена вылета, входа в сектор, время прилета являются случайными величинами
- предположение о нормальном распределении времени пролета каждой точки маршрута
- Математическое ожидание времени пролета точек считается равным значению из актуального плана полета в каждый момент времени, среднеквадратическое отклонение (СКО) времени пролета прямо пропорционально времени, оставшемуся до математического ожидания времени пролета

Каким образом учитывать неопределенность?

Прогноз уровня загрузки i -го сектора в k -й час

$$M(I_{ki}) = \sum_{r=0}^{n_i} P(t_{ki}^r \in [b, e]) = \sum_{r=0}^{n_i} \int_b^e f(t_{ki}^r) dt$$

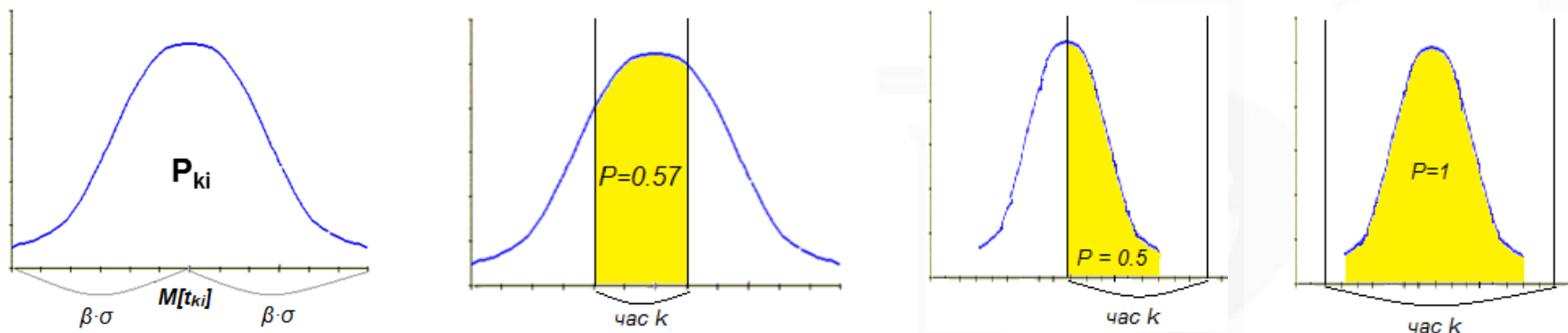
где

$[b, e]$ – заданный временной интервал;

$P(t_{ki}^r \in [b, e])$ – вероятность входа r -ого рейса в k -ый час в i -ый сектор;

$\int_b^e f(t_{ki}^r)$ – плотность распределения времени входа r -ого рейса в i -ый сектор

n_i – количество рейсов, загружающих сектор i

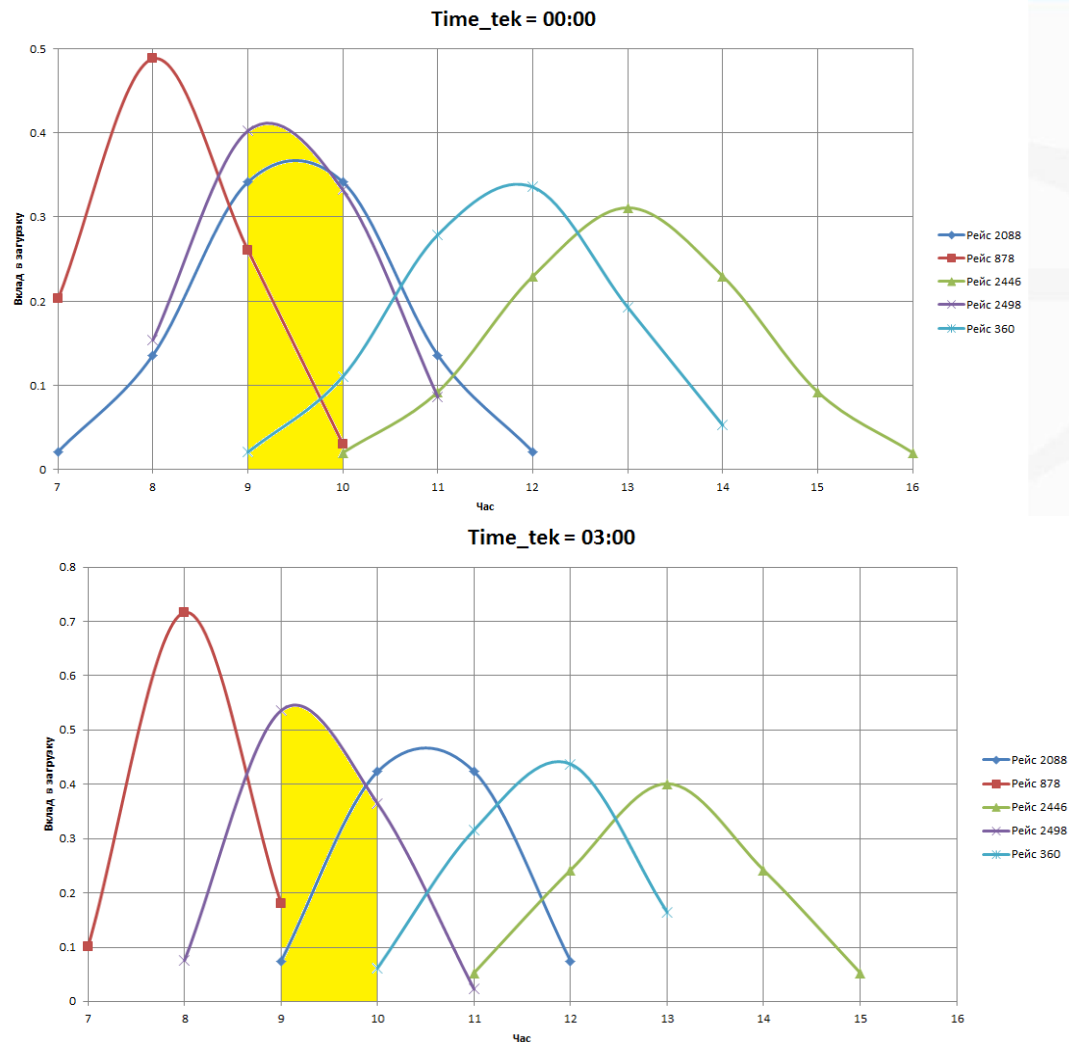


Вклад рейса в загрузку сектор-часа – вероятность P_{ki} попадания рейса в k -ый сектор в i -ый час, для нормально распределенной случайной величины:

$$P_{ki} = \int_{i-1}^i f(t_{ki}) dt$$

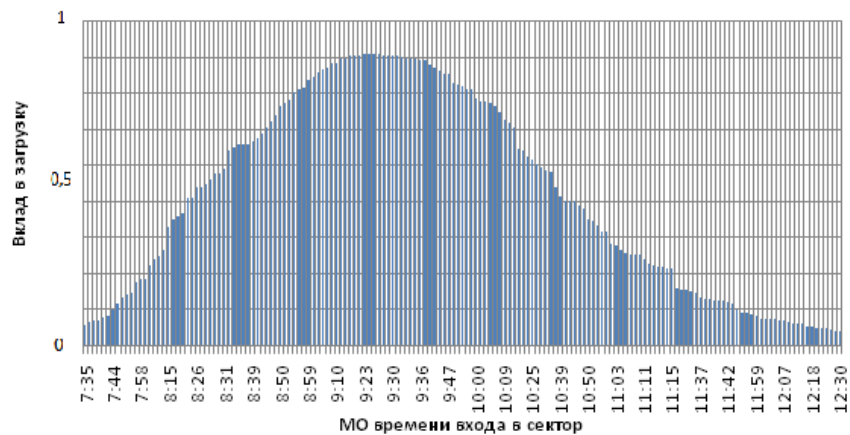


Изменение вклада рейсов в загрузку сектор-часа

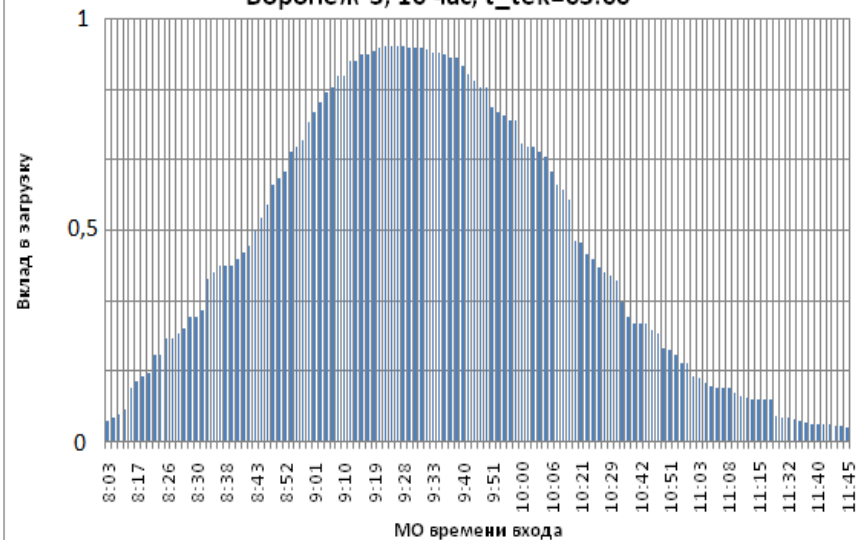


Пример прогноза загрузки 10-го часа сектора Воронеж-3 (данные за 30.06.2014)

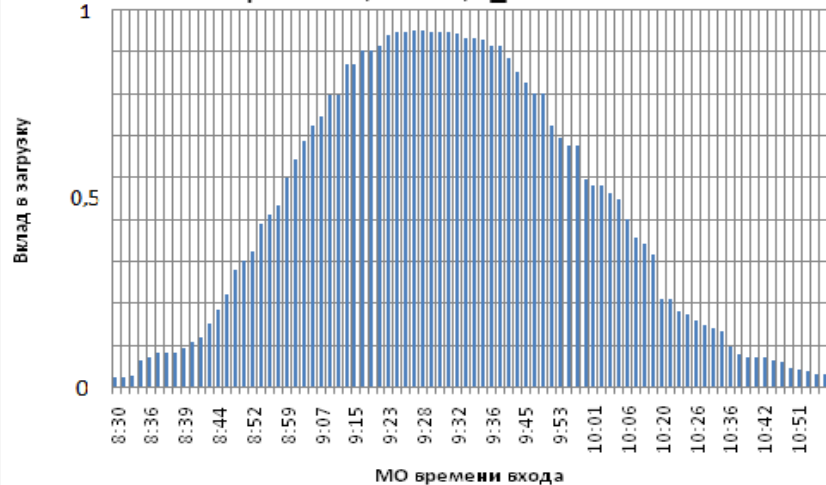
Воронеж - 3, 10-й час, $t_{\text{tek}}=00:00$



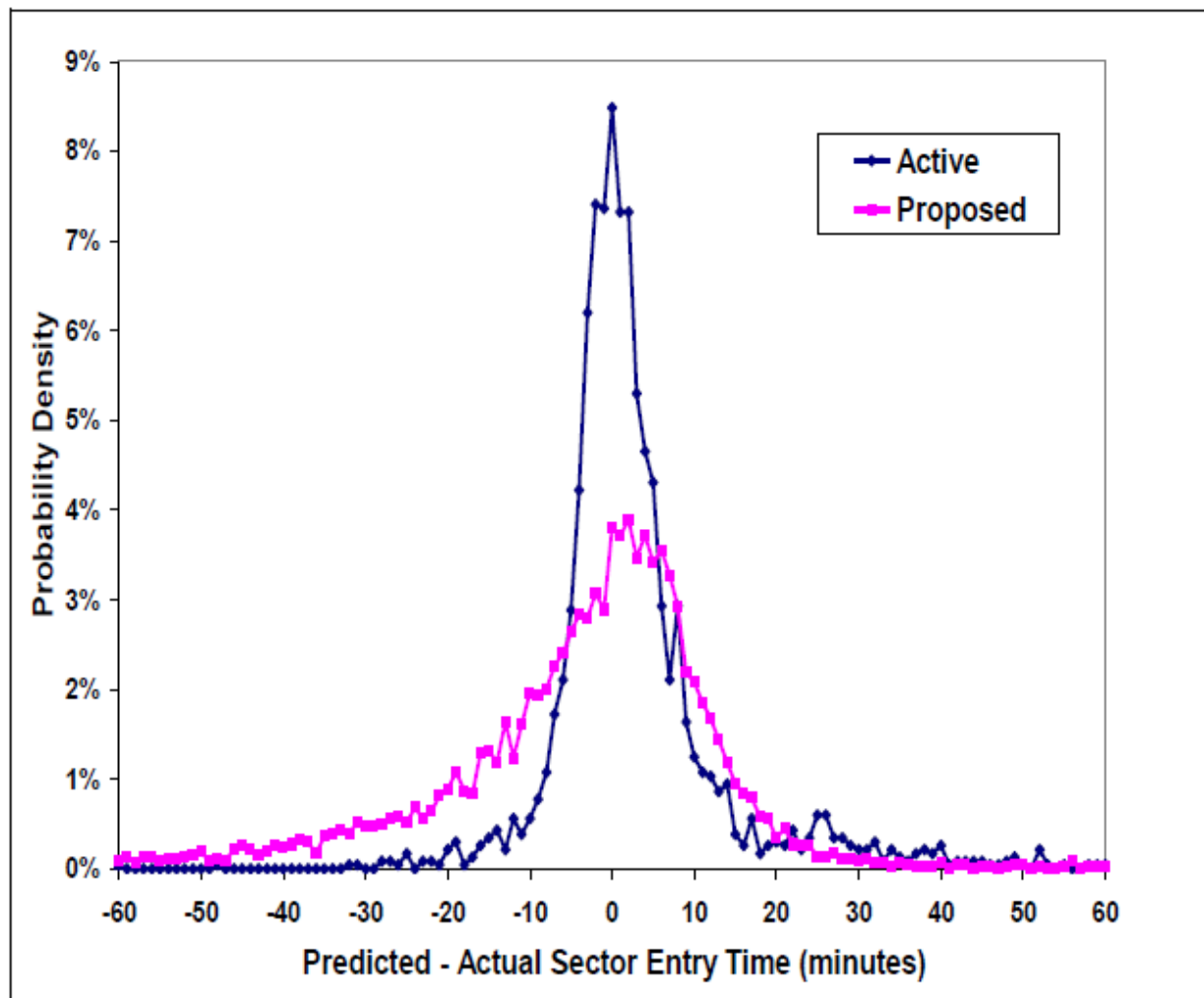
Воронеж-3, 10 час, $t_{\text{tek}}=03:00$



Воронеж-3, 10 час, $t_{\text{tek}}=06:00$



Пример. Статистический анализ ошибки в прогнозировании времени входа в сектор (данные по США за 2009г.). Авторы E.Gilbo, S.Smith



Ошибки в прогнозировании времени входа в сектор

Глубина прогноза до 3 часов

СКО 4-12 минут для вылетевших рейсов и 15-22 минут для невылетевших полетов.

СКО ошибки для времени пребывания в секторе была 4 минуты или меньше как для активных, так и для предстоящих полетов

- Оценить неопределенность и точность прогнозов загрузки секторов
 - Реальные плановые данные за 15 лет из ГК по ОрВД
 - Радиолокационные данные (центры УВД, Flight Radar 24)
- На основе этих данных оценить работу детерминистских алгоритмов (CASA, GDP, жадный алгоритм)
- Создать алгоритм, учитывающий неопределенность прогноза

- 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
- E. Gilbo, S. Smith, “New Method for Probabilistic Traffic Demand Predictions for En Route Sectors Based on Uncertain Predictions of Individual Flight Events”, *ATM Seminar 2011*
- Gaetan Marceau, Marc Schoenauer, Pierre Saveant, “Strategic Planning in Air Traffic Control as a Multi-objective Stochastic Optimization Problem”, *ATM Seminar 2013*
- A. Agustin, A. Alonso-Ayuso, L. F. Escudero and C. Pizzaro: *Mathematical optimization models for air traffic flow management: A Review*. 2009
- C. Taylor, Tudor Masek, Craig R Wanke, S. Roy, “Designing traffic flow management strategies under uncertainty”, *ATM Seminar 2015*
- G. Marceau Caron, P. Saveant, M. Schoenauer, “Increasing Air Traffic - What is the Problem?”, *2nd SESAR Innovation Days (November 2012)*, Braunschweig, Germany
- G. Marceau Caron, P. Saveant, M. Schoenauer, “Multiobjective Tactical Planning under Uncertainty for Air Traffic Flow and Capacity Management”, *2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation (June 2013)*, Cancun, Mexico



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Спасибо за внимание!

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

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

www.hse.ru