На правах рукописи

Пономарев Кирилл Юрьевич

МЕТОД ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВОЗДУШНОЙ ОБСТАНОВКИ НА КОНФЛИКТНОСТЬ ПОСРЕДСТВОМ ПОЛИХРОМНОГО ОТОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В ИНФОРМАЦИОННОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ ДИСПЕТЧЕРА УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

2.9.6 Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова» (ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова)

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры № 22 «Организации и управления в транспортных системах» ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова
Крыжановский Георгий Алексеевич

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Радиотехнических и оптоэлектронных комплексов Института радиотехники и инфокоммуникационных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»
Вельмисов Игорь Анатольевич

Кандидат технических наук, доцент, руководитель направления координации научно-методического сопровождения проектов БАС научного центра исследований, координации и развития технологий БАС Федерального государственного унитарного предприятия «Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации»
Губерман Игорь Борисович

Ведущая организация: Акционерное общество «Ордена Трудового Красного Знамени
Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры» (АО «ВНИИРА»)

Защита состоится «30» июня 2023 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 42.2.002.01 на базе ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова по адресу: 196210, г. Санкт-Петербург, ул. Пилотов, д. 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова и на сайте: https://spbguga.ru/root/main/obyavleniya-o-zashchite-dissertatsij-42-2-002-01/.

Автореферат разослан «25» апреля 2023 года.

Ученый секретарь
Диссертационного совета 42.2.002.01
кандидат технических наук, доцент Н.Е.Баранов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Необходимость совершенствования и адаптации системы организации воздушного движения (ОрВД) отчетливо наблюдается в развивающейся среде авиационных перевозок, подверженных многочисленным факторам влияния в наступившем десятилетии.

Одним из основных компонентов системы ОрВД является управление воздушным движением – УВД.

Определено, что ключевым фактором опасности при УВД является пропуск диспетчером УВД потенциально конфликтных ситуаций сближения воздушных судов в часы «пик». При этом информация о движении предоставляется диспетчеру УВД посредством информационного обеспечения (ИО) в АС УВД, которую он анализирует и оценивает на конфликтность.

Поэтому актуальным и необходимым является развитие существующих методов оценки динамической воздушной обстановки (ДВО) на конфликтность диспетчером УВД. Одним из возможных путей решения данной задачи выступает полихромное отображение объектов в ИО, на основе которого ставится прикладная задача разработки цветографических решений и визуализации информации в форме, способствующей наилучшему восприятию, а также сокращению факторов опасности, включая информационную перегрузку и дефицит времени на функциональные операции. Решению поставленных задач посвящена настоящая диссертационная работа.

Степень разработанности темы исследования.

Значительный вклад в научную разработку вопросов использования ИО в деятельности человека-оператора и, в частности, диспетчера УВД внесли ученые: А. А. Денисов, М.А. Котик, Г.А. Крыжановский, А.П. Плясовских, А.Н. Новиков, – а также зарубежные ученые: M.R. Endsley, R. Parasuraman, H. Eißfeldt, L. Reynolds, C. Metcalfe и др. Тогда как исследование пространственно-объемных форм в ИО диспетчера УВД – как это происходит, например, в архитектурной колористике – не осуществлялось, за исключением цветовой аварийной сигнализации и классификации предупреждений.

Объект исследования – информационное обеспечение диспетчера УВД.

Предмет исследования – метод оценки динамической воздушной обстановки на конфликтность на основе полихромного отображения объектов в информационном обеспечении диспетчера УВД.

Цель и задачи исследования

Целью работы является повышение эффективности оценки динамической воздушной

обстановки на конфликтность путем сокращения времени обнаружения потенциальных конфликтных ситуаций и улучшения их выявляемости за счет полихромного представления объектов в информационном обеспечении диспетчера УВД.

Для достижения поставленной цели поставлены следующие задачи:

1. Анализ визуально-когнитивной составляющей деятельности диспетчера УВД, а также способов представления цветографической информации в интерфейсе АС УВД для определения проблем при восприятии ДВО диспетчером УВД и её оценке на конфликтность;

2. Разработка модели информационного обеспечения (ИО) диспетчера УВД с учетом профессионально-мотивационной составляющей деятельности для применения в проектировании имитационных моделей и оценке результатов экспериментов.

3. Разработка в модели ИО диспетчера УВД функционального блока, отражающего условия дефицита времени и различную сложность ДВО, а также аналитической модели процесса формирования информационного образа ДВО при полихромии объектов управления в средствах ИО диспетчера УВД для обоснования преимущества цветографических решений;

4. Разработка метода полутоновой полихромной визуализации элементов ДВО в ИО диспетчера УВД, улучшающего его ситуационную осведомленность:

- для снижения времени оценки ДВО на наличие потенциально-конфликтных ситуаций (ПКС) и конфликтных ситуаций (КС) при минимальном количестве ошибок;

- для снижения времени восприятия состава ВС в эшелон-уровнях;

- для повышения выявляемости ПКС, а также устранения «слепых зон» при анализе ДВО;

- для поддержки принятия решений при дефиците времени и повышенной сложности;

5. Разработка метода оценки ДВО на конфликтность посредством полихромного отображения объектов в ИО диспетчера УВД;

6. Оценка результатов деятельности различных групп испытуемых в полунатурных моделях ДВО при использовании временных показателей эффективности ЛПР, а также безошибочности работы с цветографическими решениями визуализации в ЧМИ.

Научной новизной обладает разработанный метод полутоновой полихромной визуализации элементов ДВО, который позволяет повысить ситуационную осведомленность диспетчера УВД посредством сокращения времени восприятия объектов управления в ИО АС УВД за счет повышения содержательности информации при проекции полихромных динамических данных информационного пространства отображения ДВО в пространство цвето-хроматической когнитивной перспективы человека.

Научной новизной также обладает подход к конструированию имитационных моделей ДВО, отличающийся использованием разработанных функциональных блоков сложности

УВД/ДВО и дефицита времени при ППР, как дополнения к существующей модели ИО диспетчера УВД

Теоретическая значимость заключается в том, что применение визуализации объектов управления в средствах ИО диспетчера УВД с основными принципами разработки цветографических решений идеального и реального ИО диспетчера УВД позволяет иметь надежный инструментарий для совершенствования визуально-когнитивной составляющей УВД и проектирования прорывных технологий человеко-машинного взаимодействия, а также возможного повышения пропускной способности системы УВД.

Практическая значимость заключается в следующем:

1. Формализация функциональных процессов визуально-когнитивной составляющей деятельности диспетчера УВД даёт возможность разработать подход к оценке эффективности применения конкретных цветографических решений визуализации в ИО АС УВД с учетом личностного фактора и остаточной энтропии.

2. Предлагаемые модели ИО диспетчера УВД с функциональными блоками, связывающими параметры сложности УВД/ДВО и дефицита времени при УВД с личностным фактором, являются необходимыми при проектировании цветографических решений ИО и при использования разработанных в натурных и полунатурных моделях ИО при проведении исследований их эффективности.

3. Применение разработанного метода полутоновой полихромной визуализации элементов ДВО в современных графических интерфейсах ИО АС УВД позволяют устранить:

- неизбежное нагромождение информационных элементов при высокой плотности ВД, требующие их упорядочения;
- существование «слепых зон», пробелов восприятия и не выявление ПКС и КС при анализе ДВО и согласованиях действий по УВД со смежными ДП в виду особенностей графического представления секторизации, алгоритмов распределения потока ВС, деятельности сопутствующих ведомств и др.;
- избыточную сигнализацию о конфликтующих ВС в окне потенциальных конфликтов;
- наложение нескольких графических инструментов АС УВД при их одновременном использовании;
- нарушения цветовых контрастов, влекущие пробелы в восприятии ДВО (включая сигнализацию STCA и SSA), при активизации зон ограничений, делающих практически невозможным корректный анализ ДВО.

4. Прикладное значение визуализации ДВО заключается в том, что при её использовании повышается ситуационная осведомленность и сокращается время восприятия

объектов управления, в частности, диспетчера УВД, а в целом –«человека-оператора» СЧИМ в смежных областях УВД – системе ОВД и ОрВД.

5. Возможность применения полихромии и связанного с ней явления хроматической стереоскопии к отображению динамических элементов ИО других подсистем ОрВД: планирования и организации потоков, предполетного брифинга, метеорологической службы, службы аэронавигационной информации, службы радио-технического обеспечения полетов, службы поиска и спасания и др., – для повышения эффективности работы авиационных специалистов, снижения неопределенности обрабатываемых данных и уменьшения времени на анализ элементов соответствующего ИО.

Методология исследования базируется на комплексном подходе к анализу системы УВД при решении поставленных задач с использованием фундаментальных исследований моделирования ППР при УВД в рамках функциональных систем человека, исследований отечественных и зарубежных специалистов в области разработки ИО в АС УВД, а также установленных стандартов человеко-ориентированного проектирования интерактивных систем и ИО техники и операторской деятельности (ИОТОД), эргономики пользовательских интерфейсов и инженерной психологии, колористики, цветоведения и информационного дизайна.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Алгоритм конструирования ситуаций УВД с заданным уровнем сложности на основе разработанных дополнений к существующей модели информационного обеспечения диспетчера УВД в виде функциональных блоков сложности УВД и факторов дефицита, который позволяет разрабатывать цветографические решения в интерфейсе АС УВД для оценки динамической воздушной обстановки – ДВО – на конфликтность;

2. Метод полутоновой полихромной визуализации ДВО для повышения ситуационной осведомленности диспетчера УВД при оценке конфликтности воздушного движения высокой плотности и его применение к представлению радиолокационных меток ВС и их формуляров в средствах информационного обеспечения диспетчера района УВД, отличающийся созданием объемно-пространственных цветовых плоскостей ДВО;

3. Метод оценки ДВО на конфликтность посредством полихромного отображения объектов в информационном обеспечении диспетчера УВД, позволяющий сократить время восприятия элементов ДВО при анализе состава эшелон-уровней вдвое и при оценке ДВО на конфликтность в среднем на 25,8%.

Достоверность результатов исследования подкреплена:

- проведением экспериментальных исследований среди действующих диспетчеров УВД Минского центра УВД, студентов выпускного курса по соответствующей специальности

Белорусской государственной академии авиации согласно методикам проведения экспериментов и представления результатов, основанных на теории и практике инженерно-психологического проектирования и экспертизы, разработанных в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники под руководством специалистов Объединенного института проблем информатики НАН Республики Беларусь с учетом дополнений, требовавшихся в рамках тематики диссертации;

- полученными практическими рекомендациями, принятыми при внедрении разработанной системы оперативной оценки ДВО «Скроллинг» в белорусских компаниях-разработчиках ПО для АС УВД – ОАО «АГАТ-системы управления» и ООО «ATMsystems», по реализуемости соответствующих цветографических решений и формированию производственных процессов, применяя разработанный метод, что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Апробация работы. Основные результаты и идеи диссертационного исследования докладывались на Белорусском промышленном форуме в 2018 г., а также 5 научных конференциях, в т.ч.: IV международной научно-практической конференции курсантов, студентов и слушателей (Минск, 2007 г.), II международной молодежной научная конференции «Гражданская авиация: XXI век» (Ульяновск 2010 г.), II научно-практической конференции студентов и курсантов Минского государственного высшего авиационного колледжа (Минск, 2010 г.), III международной заочной научно-практической конференции «Авиация: история, современность, перспективы развития» (Минск, 2018 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Технологии построения когнитивных транспортных систем» (СПБ, 2018).

Публикации. По результатам исследования опубликовано 12 печатных работ, в том числе: 7 публикаций в рецензируемых научных изданиях, 5 в рекомендованных ВАК РФ и 2 – в ВАК РБ; 5 публикаций в других изданиях.

Реализация результатов работы. Полученные результаты исследования использованы в разработке и внедрении в КСА УВД системы оперативной оценки ДВО «Скроллинг» для проведения последующих производственных испытаний в белорусских компаниях-разработчиках ПО для АС УВД – ОАО «АГАТ-системы управления» и ООО «ATMsystems», а также проведении семинаров в службе воздушного движения Минского центра УВД, кафедрах Белорусской государственной академии авиации и Института повышении квалификации и переподготовки Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, выводов по главам, заключения, списка литературы и 4-х приложений. Диссертация содержит 183

страниц, иллюстрированных 6 таблицами, работа содержит 44 рисунка. Список литературы насчитывает 151 наименование, из которых 50 на иностранном языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, дана оценка степени разработанности темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Изложены положения, выносимые на защиту. Отражены апробация и внедрение результатов исследования.

В первой главе проведен анализ системы ОрВД в развивающейся среде авиационных перевозок, исследованы проблемы оценки динамической воздушной обстановки (ДВО) диспетчером УВД, а также инициативы мирового авиационного сообщества в рамках концепций CNS/ATM и ASBU (Глобальный аэронавигационный план 2016-2030, ICAO Doc.9750) по развитию и разработке средств обеспечения принятия решений и улучшения ситуационной осведомленности диспетчера УВД.

Поскольку на современном этапе применение средств автоматизации и интеллектуальных информационных систем в УВД не предусматривает исключение человека, то организационно-процедурные усовершенствования процессов УВД поднимают проблематику информационного обеспечения (ИО) диспетчера УВД по двум основным направлениям:

1) качественная переработка данных об объекте управления и улучшение его ситуационной осведомленности;

2) исключение информационной перегруженности и дефицита времени на функциональные операции.

Несмотря на простоту, рациональность и результативность уже внедренных средств улучшения ситуационной осведомленности диспетчера УВД, в ходе длительных наблюдений и на основании практики ОВД в АС УВД, а также изучения практики специалистов из центров УВД Российской Федерации, стран ЕС и Великобритании, сопоставив их с исследованиями ICAO, EUROCONTROL, FAA, институтов СНГ, США, ЕС и др. компаний, был выявлен ряд факторов опасности в визуально-когнитивной части взаимодействия диспетчера УВД с информационной средой человеко-машинного интерфейса в АС УВД.

Основная опасность заключается в пропуске диспетчером УВД сходящихся радиолокационных меток ВС на интервалы менее установленных (в том числе предупреждений и сигнализаций) или невозможность заранее оценить развитие таких ситуаций при информационной перегруженности человеко-машинного интерфейса (ЧМИ) АС

УВД, что приводит к повышению риска неблагоприятных событий, к принятию нерациональных решений в условиях стресса и экстремальной срочности.

Цветографические решения ИО диспетчера УВД на основе полихромии выступают одним из возможных путей решения поставленных задач. Это следует из того, что:

- визуальные средства АС УВД являются основным инструментом подготовки управленческих решений диспетчером УВД в условиях высокой плотности ВС в зоне ответственности;

- из эффективного многолетнего опыта создания и применения комплексов средств автоматизации в УВД и других областях техники с цветографическим, полихромным представлением объектов управления в многофакторной динамической среде, при которых осуществляется эффективное достижение целей деятельности.

Во второй главе предложены принципы и модели, используемые для построения цветографических решений ИО диспетчера УВД, а также возможные методы оценки создаваемого ими эффекта в практической деятельности для выбора наиболее целесообразного варианта.

В условиях лимитированного по времени ППР более быстрая и точная оценка входных сигналов о ДВО оставляет больший временной запас непосредственно для реализации рационального принятия решения, что снижает факторы риска при обеспечении безопасности полетов – в настоящей работе прежде всего это пропуск потенциально-конфликтных ситуаций диспетчером УВД.

Стержневым принципом разработки цветографических решений интерфейса АС УВД является ориентированность на основного его пользователя – диспетчера УВД. Такой подход позволяет:

1. Определить набор элементов ДВО в характерных ситуациях УВД в конкретных средствах ИО диспетчера УВД, за счет которых будет решена задача улучшения ситуационной осведомленности и повышения эффективности оценки потенциально-конфликтных ситуаций (ПКС);

2. Определить и оценить возможное сокращение времени восприятия элементов ДВО диспетчером УВД посредством визуализации объектов управления;

3. Выявить возможное нежелательное влияние разрабатываемых цветографических моделей ДВО на результаты ППР при УВД.

Принципиальную важность при этом имеют типовые концепции разработки пользовательского интерфейса, заложенные в саму специфику человеко-машинного взаимодействия: законы робототехники, основы когнитивной психологии, цветовой гармонии, композиции и др.

Агрегирование визуализации элементов ДВО в конкретном цветографическом решении и конкретного функционала диспетчера УВД определяет необходимость построения моделей его информационного обеспечения. Для того, чтобы определить прикладную область визуализации ДВО, применяется строгая декомпозиция процессов системы ОВД, отделяя их от процессов систем ПИО и АО, потому как визуально-когнитивная составляющая деятельности диспетчера УВД имеет высокую степень сложности при формализации.

В процессе функционирования системы УВД основная задача безопасного перемещения ВС решается *k*-ым диспетчером УВД на основе деятельности, связанной с мыслительным процессом, отчетливо указывающем на последовательную смену состояний психики при ППР – $E_i^{(k)}(S^{(k)}(t))$ – в момент времени t при некотором состоянии ДВО $S^k(t)$, в общем случае: $E_1^{(k)}$ – восприятие данных и выработка информационного образа; $E_2^{(k)}$ – переработка и анализ информации; $E_3^{(k)}$ – принятие решения; $E_4^{(k)}$ – действия по реализации принятого решения. Визуально-когнитивная составляющая в модели ИО диспетчера УВД представляется 1-м и 2-м состояниями.

Структура моделей взаимодействия диспетчера УВД с информационным обеспечением должна отображать как логико-функциональную декомпозицию компонентов, так и психическую составляющую деятельности диспетчера УВД при восприятии и анализе информации ДВО (Рисунок – 1). Для чего в диссертации совмещаются два подхода к моделированию:

- моделирование ИО диспетчера УВД с учетом профессионально-мотивационной составляющей деятельности согласно теории функциональных систем;
- моделирование ИО диспетчера УВД с учетом сложности ДВО.

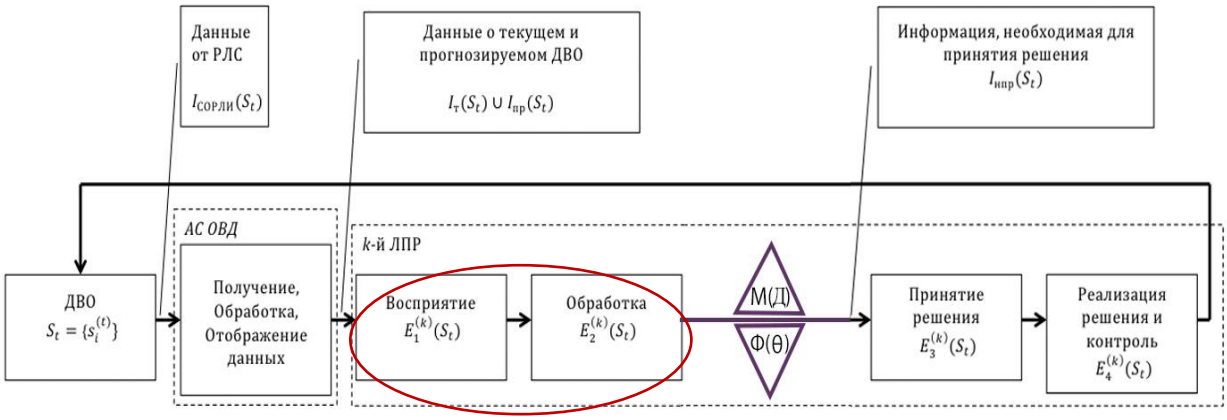

Рисунок 1 –Модель ИО диспетчера УВД с дополнительными функциональными блоками: М(Д) – блок профессионально-мотивационной составляющей деятельности диспетчера УВД,

Ф(θ) – блок сложности ситуаций УВД (по психо-физиологической составляющей деят-ти) [собственная разработка на основе модели ИО[1]].

В этой связи в диссертации решается задача моделирования дополнительных функциональных блоков: М(Д) – блок профессионально-мотивационной составляющей деятельности диспетчера УВД и Ф(θ) – блок сложности ситуаций УВД (по психофизиологической составляющей деятельности), - компонентный состав которых представлен на Рисунке – 2.

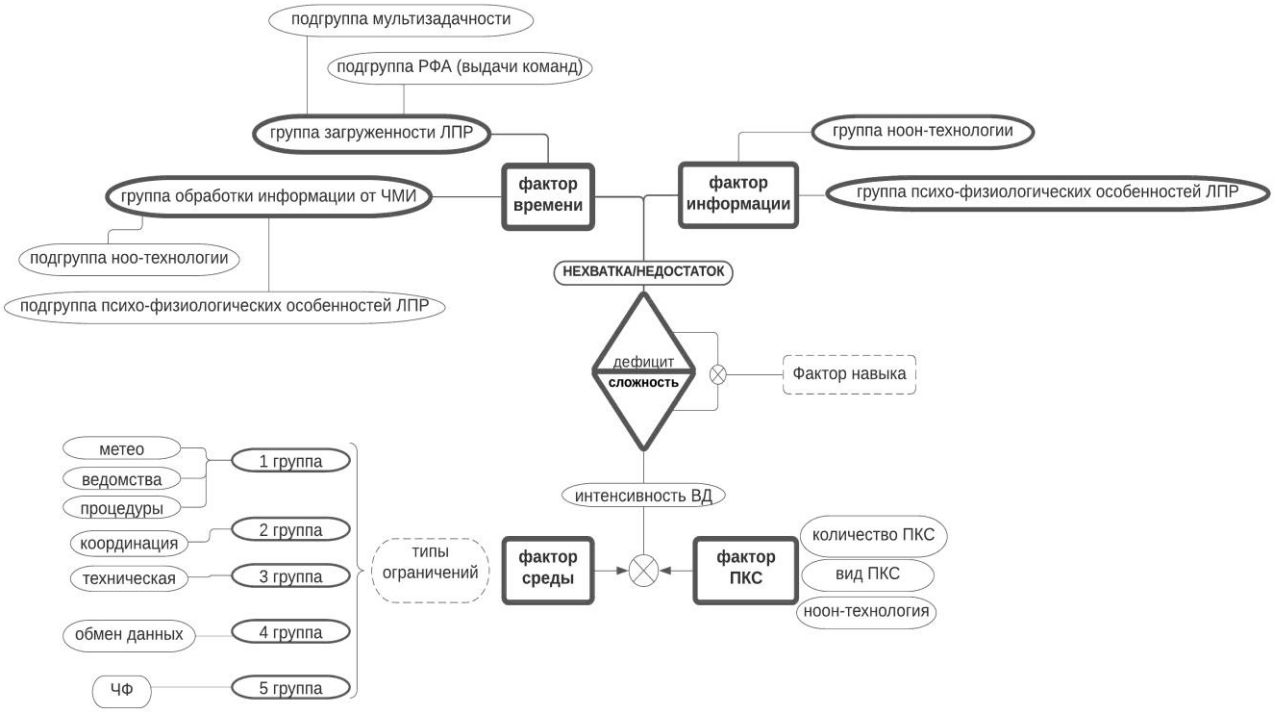

Рисунок 2 – Компонентный состав дополнительных функциональных блоков в модели ИО диспетчера УВД для задач конструирования ситуаций ДВО [собственная разработка]

Разработанная модель ИО диспетчера УВД позволяет конструировать ситуации УВД с заданным уровнем сложности для анализа эффективности деятельности диспетчера УВД при использовании конкретных цветографических решений на основе полихромии – для чего во второй главе представлен алгоритм конструирования ситуаций УВД на основе модели ИО с дополнительными функциональными блоками (Рисунок – 3).

[1] Плясовских, А. П. Разработка методов и средств процедурного контроля воздушного движения: дис. … докт. техн. наук : 05.22.13 / А. П. Плясовских. – С.-Петербург, 2005. – 335 с

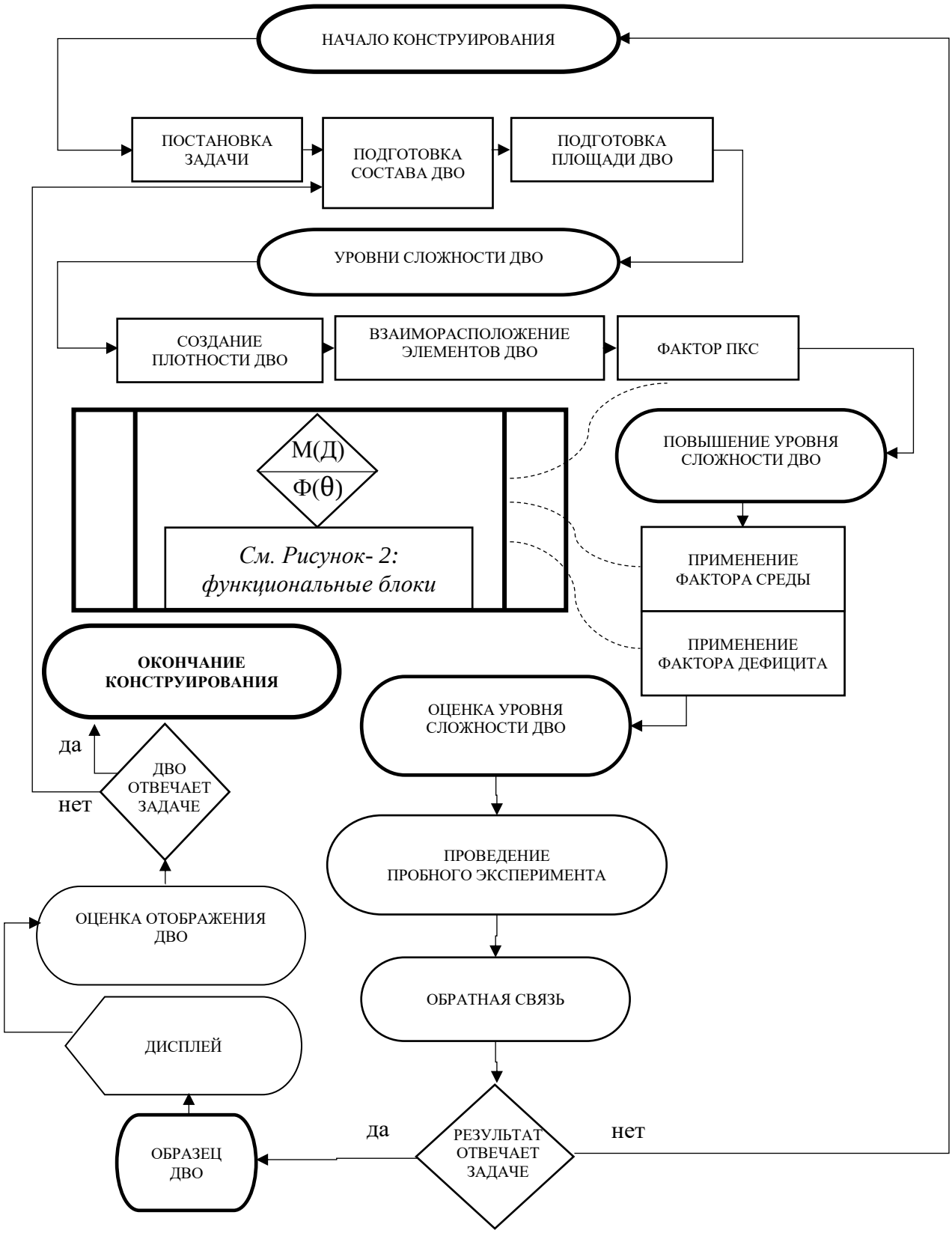

Рисунок 3 – Алгоритм конструирования ситуаций УВД с заданным уровнем сложности ДВО для разработки цветографических решений ИО диспетчера УВД [собственная разработка]

Алгоритм основан на практике проектирования имитационных моделей ДВО, а также аналитического исследования факторов сложности и дефицита при УВД в группе, состоящей из 33 действующих диспетчеров УВД. Представленной последовательности действий оказалось достаточно для решения задач конструирования 18 имитационных моделей ДВО с настающим уровнем сложности при исследовании методов полихромии в высотном признаке взаиморасположения ВС в ЧМИ АС УВД.

Отдельной задачей при разработке цветографических решений ИО диспетчера УВД является выбор показателей и методов оценки их эффективности.

Такие характеристики деятельности диспетчера, как число ошибок интерпретации данных и проекций развития ДВО, скорость восприятия информации, число пропусков в решении конкретного вида задач по УВД в определённой ситуации при определённом уровне профессиональной подготовки и качества плана движения, находятся в зависимости от качества

решения задач организации УВД, к которым можно отнести и задачу поиска рационального взаимодействия диспетчера с его ИО в АС УВД. Для этих целей оценка цветографических решений ИО диспетчера УВД производится выбранными для данного исследования методами:

1) сравнение идеального и реального ИО.

В качестве идеального рассматривается такое ИО, при котором этапы восприятия и обработки данных минимизированы настолько, что ЛПР используются только те данные, которые необходимы непосредственно для принятия решения (1):

$$\left[\begin{array}{l} I_{ппр}\left(S(t), \zeta_{\Lambda}(t), U_{S_t}^{(k)}\right) = F^{(k)}\left(\left(I_o(S(t), \zeta_{\Lambda}(t), U_{S_t}^{(k)}) \cup I_{Д}(S(t), \zeta_{\Lambda}(t))\right)\right. \\ I_{ппр} \to \min \end{array}\right., \quad (1)$$

где ППР – процесс принятия решения;

$S(t)$ – состояние ДВО;

$U_{S_t}^{(k)}$ – РФА при ППР в $S(t)$;

$I_{ппр}$ – информация, требуемая для ППР;

I_o – основная информация для ППР (текущая ДВО и проноз развития программными средствами АС УВД);

$I_{Д}$ – дополнительная информация, необходимая для ППР.

$F^{(k)}(\dots)$ – функция переработки информации (данных) k-м ЛПР. Разные ЛПР могут использовать разные алгоритмы переработки информации в зависимости от их $\Phi^{(k)}(t)$, а также предпочтений или индивидуально ожидаемой ценностью.

$\zeta_{\Lambda}(t)$ – вид информации (данных) о состоянии ДВО (например, данные о параметрах

движения – метки, формуляры; границы зоны ответственности, визуальные обозначения маршрутов и параметры отклонения траекторий движения, метеорологические графические или буквенные данные, информация дисплея потенциально-конфликтных ситуаций);

2) метод вектор-функционала характеристик личностного фактора;

Для оценки изменений индивидуальных ценностей ЛПР в зависимости от получаемой информации в средствах отображения АС УВД, вводится пространство характеристик личностного фактора $\mathbf{L_\Lambda}$. Важнейшими компонентами L_Λ являются:

- $p_i^{(k)} \in L_p^{(k)} -$ вероятности выбора решений $U_i^{(k)}$ $(i = \overline{1, n_u^{(k)}} -$ число решений, образующее области допустимых решений $L_U^{(k)})$, соотнесенных с областью $L_X^{(k)}$ предполагаемых k-ым ЛПР результатов развития ДВО – $S^{*}{}_j^{(k)}$, и получаемых в действительности – $S_j^{(k)}$, где $j = \overline{1, n_S^{*(k)}}$ – число результатов;

- $J_{ij}^{(\upsilon,k)}$ – показатели эффективности, оценивающие принятые решения и достигнутые результаты по $\upsilon = \overline{1, \mu_k}$ – числу частных показателей эффективности k-го ЛПР;

- $M_j^{(k)} \in L_M^{(k)} -$ мотивация, формирующая область – $L_\Psi^{(k)}$– индивидуальных ценностей каждого j-го результата для каждого k-го ЛПР – $\Psi_j^{(k)}$.

Объединение компонент пространства характеристик личностного фактора диспетчера УВД образует вектор-функционал характеристик личностного фактора, что дает возможностью определять его количественную меру (2):

$$\vec{V}_r^{(k)} = \vec{V}_r^{(k)}\left(p\left(s_r^{(k)}\right), J\left(s_r^{(k)}\right), M(s_r^{(k)})\right), \qquad (2)$$

где $\vec{V}_r^{(k)}$ – вектор-функционал характеристик личностного фактора диспетчера УВД;

r – число учитываемых ситуаций УВД;

$s_r^{(k)}$ – частная понятийная ситуация УВД из набора информационных комплексов k-го диспетчера УВД.

Это обстоятельство позволяет ввести меру характеристики понятия информационного обеспечения ППР, так как основным «потребителем» информации в системе является k-е ЛПР – диспетчер УВД;

3) повышение семантической емкости информации о ДВО (при сохранении возможности безошибочной работы).

Семантическая емкость представляет собой отношение количества смысловой (семантической) информации к объему обработанных данных (3):

$$SC = I_{сем}^{s_t^{(k)}}/V_t = I_{сем}/(I_{семиот} \cdot \Delta T_k), \qquad (3)$$

где SC – семантическая емкость (содержательность) информации;

$I_{сем}^{s_t^{(k)}}$ – количество семантической меры информации – смысла – в сообщении (точнее, в воспринятом фрагменте информационной среды, отображающим ДВО – $s_t^{(k)}$);

V_t – объем обработанных данных (отображавших сообщение), который представляет актуальное количество семиотической (знаковой) меры информации для ситуации $s_t^{(k)}$, в течение определенного быстродействием k-го диспетчера интервала времени;

$I_{семиот}$ – количество семиотической (знаковой) информации;

ΔT_k – интервал времени, затрачиваемый k-ым диспетчером УВД на обработку $I_{семиот}$ и выработку смысла $I_{сем}^{s_t^{(k)}}$.

С увеличением содержательности информации растет семантическая пропускная способность информационной системы, так как для получения одних и тех же сведений требуется преобразовать меньший объем данных. Что очевидно окажет положительный эффект на этапах восприятия информационной среды при ППР диспетчером УВД.

Рассматриваемые подходы к моделированию ИО, алгоритм конструирования ситуаций УВД с заданным уровнем сложности, а также рассматриваемые модели оценки информационных и функциональных параметров цветографических решений создают возможность корректной формулировки задач следующих этапов исследования:

a) создание информационного образа ДВО в средствах ИО при использовании полихромного отображения, а также алгоритмизация конкретного функционала по УВД (в диссертационной работе – анализа ДВО на наличие ПКС) с применением полихромии в ДВО;

b) проектирование цветографических решений при полихромной визуализации ДВО, где применим существующий опыт проектирования пользовательского интерфейса: стандарты, руководства, требования, психологические законы и свойства визуально-когнитивных процессов;

c) определение комплексного показателя эффективности оценки ДВО на конфликтность диспетчером УВД.

В третьей главе предложен метод оценки ДВО на конфликтность при использовании цветографических решений на основе полихромии для решения прикладных задач анализа ДВО, поиска и обнаружения потенциальных конфликтов движения ВС, улучшения ситуационной осведомленности диспетчера УВД.

При этом использование принципов и моделей разработки цветографических решений ИО диспетчера УВД, рассмотренных во второй главе, позволило получить следующие результаты:

1) Проведено аналитическое исследование различного отображения объектов в ИО диспетчера УВД и установлено:

- 20%-е сокращение информации об объектах ДВО при полихромии;

- сокращение времени механико-моторных переключений на активизацию функций ЧМИ АС УВД (в среднем от 17% и до 100% в определенных вариантах визуализаций);

- появление эффекта семантической навигации в процессе анализа ДВО изменения поведенческих стратегий диспетчера УВД - $Z_{УВД}^{(C)}$, и алгоритмов деятельности диспетчера УВД (Z^D) при анализе ДВО на ПКС с реализацией цветографического дескриптора D в ИО (4).

$$\begin{array}{c|c} D^{(C_{1,ц})} =< s_i^t, s_i^{\Upsilon_D^k}, Z^D >, & \{\mu_{h_i}^D | \mu_{h_i}^D = (x_{ТОН}, x_{СВЕТ}, x_{НАСЫЩ})\} \in L_{ЦСН}^{(k)} \\ Z^D: s_i^t \to s_i^{\Upsilon_D^k}, & \left.\begin{array}{c} X_{ТОН}[\text{цветовой тон}] \\ X_{СВЕТ}[\text{светлота}] \\ X_{НАСЫЩ}[\text{насыщенность}] \end{array}\right\} \in L_{ЦСН}^{(k)}. \\ \{s_i^{\Upsilon_D^k}\} = \left\{ \mu_{s_i}^D \big/ s_i^{(t)} \right\}, & \\ s_i^{\Upsilon_D^k} \in S_t^{\Upsilon_D^k}, & \end{array} \quad (4)$$

Где, $L_{ЦСН}^{(k)}$ – трехмерное пространство цвето-когнитивной перспективы человека, образуемое характерными цветовыми параметрами: $X_{ТОН}$ – цветовым тоном, $X_{СВЕТ}$ – светлотой цвета, $X_{НАСЫЩ}$ – насыщенностью цвета; $x_{ТОН}, x_{СВЕТ}, x_{НАСЫЩ}$ – конкретные параметры цвета, которые применяются в ДВО; $\mu_{s_i}^D$ – функция «значимости» переменной $s_i^{(t)}$, выражаемая как принадлежность к некоторому классу толерантности для анализа k-м ЛПР.

(C) – вариант цветографического решения: 0 – монохромный; 1 – с использованием одного цветового тона из полихромной палитры; ц – с применением нескольких цветовых тонов.

Реализация дескриптора связана с эффектом направленного детектирования, сущность которого лежит в использовании такого свойства психики как внимание, когда можно говорить о семантической навигации манипулированием внимания, как механизме поддержки ППР (Рисунок – 4).

2) Разработан метод полутоновой полихромной визуализации ДВО для улучшения ситуационной осведомленности диспетчера УВД.

Основой метода является эффект семантической навигации при цветовом кодировании параметров объектов управления в ДВО, возникающем вследствие психофизиологических свойств зрительного аппарата и внимания диспетчера УД при анализе цветографического представления ДВО на экране.

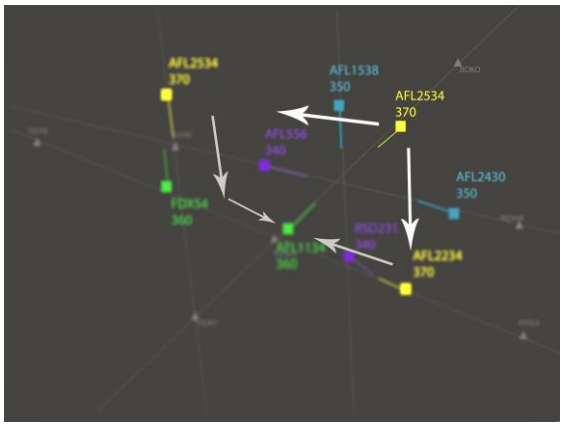

Рисунок 4 – Семантическая навигация в анализе ДВО при использовании свойств внимания и периферийного зрения

Приведены примеры его прикладного использования в виде решения практических задач, сформулированных согласно факторам опасности при УВД на маршруте, среди которых:

- устранение нагромождение формуляров сопровождения при высокой плотности ВС в зоне ответственности (Рисунок – 5);

- устранение «слепых зон» и пропусков ПКС и КС при анализе диспетчером УВД динамической воздушной обстановки на конфликтность в своей зоне ответственности;

- сокращение времени анализа окна потенциальных конфликтов в ЧМИ (Рисунок – 6);

- создание цветографического отображения возможных решений по траекторному управлению конфликтующих ВС, предлагаемых программно-аппаратным комплексом АС УВД (Рисунок – 7) и др.

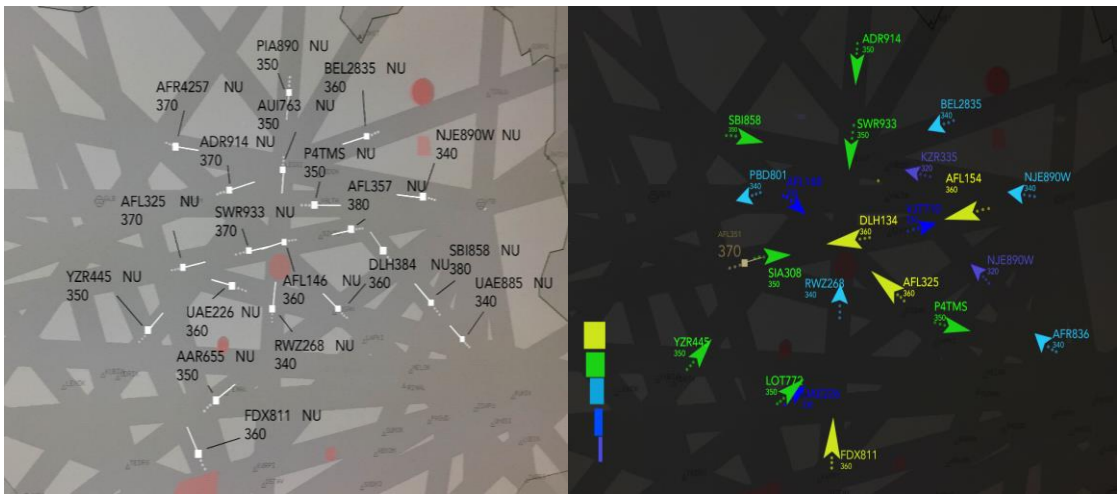

Рисунок 5 – Устранение нагромождения формуляров (ДВО – 21 ВС)

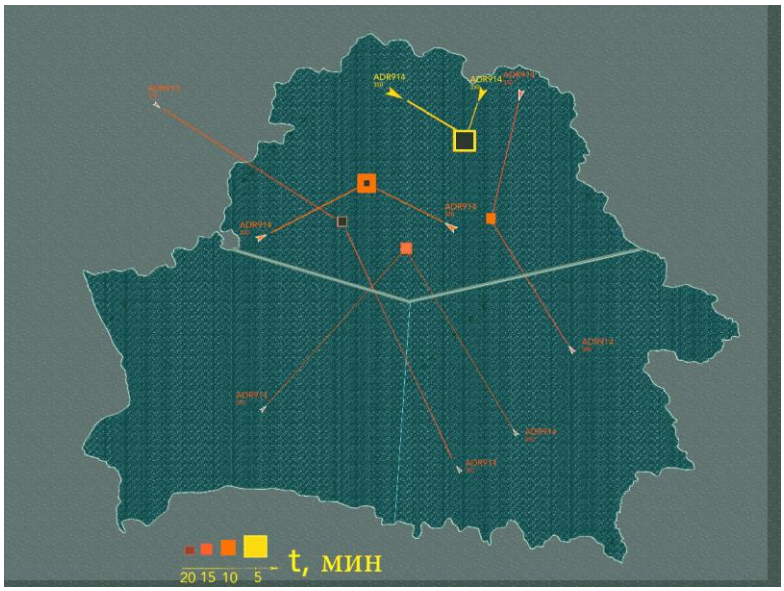

Рисунок 6 – Вариант окна потенциальных конфликтов в ИО диспетчера УВД

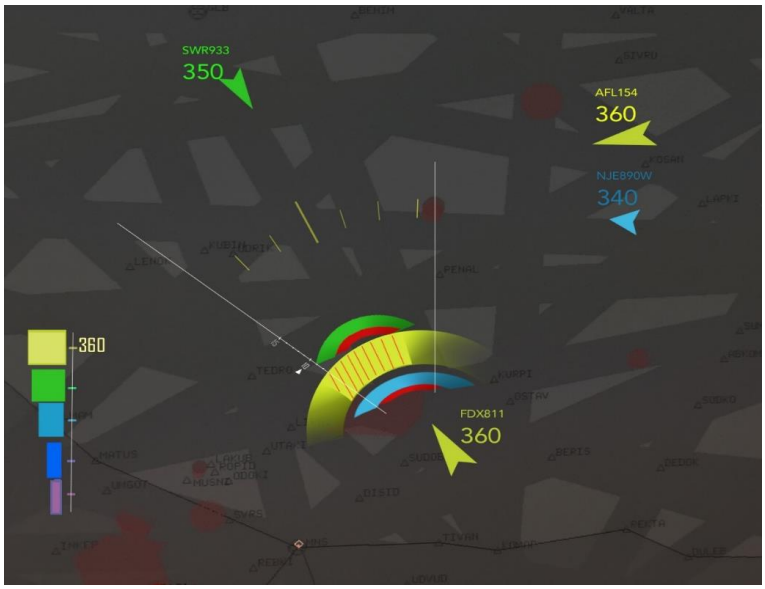

Рисунок 7 – Цветографическое представление образа опасных и возможных траекторных изменений в ЧМИ

3) Разработана принципиальная схема создания первоначального информационного образа ДВО у диспетчера УВД, а также алгоритм работы интеллектуальных операторов при полихромии объектов управления в ИО.

Интеллектуальные операторы – совокупность мыслительных преобразований информации диспетчером УВД, как ЛПР, с заданными входными, выходными параметрами, связями между ними, инструкциями по формированию наборов информационных комплексов и пр. Суть их работы – перевод информации предметной ситуации УВД в понятийную.

Причем критерием эффективности перехода предметной информации в понятийную служит минимизация объективных (время перехода, ошибки определения значимости переменных и классов толерантности) и субъективных (психофизиологических, энергетических) затрат $E^{(k)}$ (5):

$$\left.\begin{matrix} \xi\left(\mu_{s_i}^{k}\right), \xi\left(\beta_{Ц_ç}^{k}\right) \\ \Delta\tau_{\Upsilon_{\Sigma}^{k}}^{S_t} \end{matrix}\right\} \rightarrow \min, \qquad (5)$$

где $\xi\left(\mu_{s_i}^{k}\right), \xi\left(\beta_{Ц_ç}^{k}\right)$ – ошибка определения уровней значимости параметров предметной – $\mu_{s_i}^{k}$ и субпредметной ситуации УВД – $\beta_{Ц_ç}^{k}$ (для некоторой частной цели УВД – $Ц_ç$);

$\Delta\tau_{\Upsilon_{\Sigma}^{k}}^{S_t}$ – время классификации ДВО на конфликтную и бесконфликтную при помощи работы группы интеллект. операторов $\Upsilon_{\Sigma}^{k} | \Upsilon_{1}^{k} \in \Upsilon_{\Sigma}^{k}$;

Υ_{Σ}^{k} – совокупная работа нескольких интеллектуальных операторов, например (рассматриваемые в диссертации), Υ_{1}^{k} – интеллект. оператор, определяющий множество значимых переменных для цели определения взаиморасположения ВС в зоне ответственности; Υ_{2}^{k} – интеллект. оператор, определяющий классы толерантности по необходимости траекторного управления (конфликтные, бесконфликтные, потенциально-конфликтные, ситуации сближения).

На основании данных положений формируется комплексный показатель эффективности k-го диспетчера УВД – $J_{k}^{\Sigma,C}$ – при определенном способе отображения ДВО (С).

4) Рассмотрены вопросы остаточной энтропии, которая складывается из качества средств отображения ДВО и условий их использования, качества восприятия ДВО и решения задач УВД, отсутствия выработанных стратегий поведения при работе в исследуемых цветографических решениях, неопределенность оценки влияния полихромной визуализации ДВО на точность предполагаемого развития ДВО, интервалов сближения и проч.

Насколько эффективно осуществляется формирование дескриптора у человека; насколько «объемным» будет анализ полихромной ДВО и в какой степени это будет происходить в разных возрастных группах и психотипах без комплексного исследования оценить непросто. Поэтому действенность разрабатываемых цветографических решений ДВО подлежала обоснованию по выбранным методам их оценки на имитационных моделях – чему посвящена четвертая глава.

В четвертой главе производится сравнение количественных характеристик деятельности действующих диспетчеров УВД, а также диспетчеров-студентов в типовых ситуациях УВД различной сложности при оценке ДВО на наличие ПКС на имитационных

моделях ИО различной плотности ВС в зоне и состава ПКС с различными способами отображения и визуализации ДВО (аналогичны Рисунку – 5).

Результатом исследования задач обнаружения ПКС в монохромной ДВО и полихромной визуализации при работе со сложностью до 16 ВС одновременно с 2-4 ПКС в зоне ответственности диспетчера района стало:

1. Сокращение времени обнаружения ПКС:
   - на одном эшелон-уровне: на 44% – диспетчеры УВД, на 54% – студенты;
   - на трех эшелон-уровнях: на 19% – диспетчеры УВД, на 20% – студенты;
   - на пяти эшелон-уровнях: на 18% – диспетчеры УВД, равно – студенты.
2. Сокращение количества пропусков ПКС:
   - на одном эшелон-уровне: на 20% – диспетчеры УВД, на 26% – студенты;
   - на трех эшелон-уровнях: на 36% – диспетчеры УВД, на 3% – студенты;
   - на пяти эшелон-уровнях: на -2% – диспетчеры УВД, на 81% – студенты.
3. Двукратное сокращение времени определения численного состава эшелон-уровня при абсолютном превосходстве по правильности (включая условия наивысшей плотности ВС – 21 ВС на 5 эшелон-уровнях).

Оценка представленных данных показывает, что полихромная визуализация ДВО может использоваться для анализа конфликтности ДВО на одном (FL) и четырех смежных эшелон-уровнях (FL±10, FL±20) при использовании трех оттенков одного из двух цветовых тонов – синего и зеленого на темном фоне.

Использование трех (и более) оттенков зеленого и/или синего цветового тона при обозначении большего количества эшелон-уровней потребует специальной настройки средств отображения, внешней освещенности и учета цветоразличения диспетчера УВД – для компенсации остаточной энтропии.

Также реализации цветографических решений ДВО на основе полихромии способствуют:

- использование разработанной моделей ИО диспетчера УВД с функциональными блоками, учитывающими дефицит времени и сложность УВД, а также учетом профессионально-мотивационной составляющей;
- применение принципов человек-ориентированного проектирования и методов оценки влияния полихромной визуализации ДВО, предложенных в диссертационной работе;
- привлечение широкого спектра специалистов к участию в исследовании и внедрению полихромной визуализации ЧМИ в АС УВД;
- практика УВД в разработанных моделях ДВО.

Создание интерактивного, соответствующего психофизиологии человека ИО диспетчера УВД при полихромной визуализации ДВО позволит обеспечить:

- снижение загруженности визуально-когнитивной составляющей в часы высокой интенсивности воздушного движения;

- минимизацию механико-моторных операций и переключений внимания при анализе ДВО;

- развитие средств визуальной коммуникации смежных диспетчерских пунктов и способов информационного обмена;

- высокий уровень ноон-технологии в АС УВД и др.

Важно понимать при разработке и оценке способов отображения и визуализации в АС УВД, что современные средства автоматизации и интеллектуальные информационные системы, перерабатывающие большие объемы данных, самообучающиеся и осуществляющие поддержку ППР, не несут ответственности за понимание диспетчером УВД генерируемых программами подсказок. Тогда как окончательное решение в системе УВД, на сегодняшний день, остается за человеком, в существенной мере использующим средства визуализации при работе в сложных динамических АС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие научно-практические результаты:

1. Произведена декомпозиция процессов системы ОрВД и предложена структура объектов управления в средствах информационного обеспечения (ИО) диспетчера УВД, которые определили применение визуализации ДВО в человека-машинном интерфейсе АС УВД.

2. Разработана функциональная модель ИО диспетчера УВД с учетом профессионально-мотивационной составляющей деятельности, отражающая условия дефицита времени при УВД и различную сложность УВД/ДВО, для использования при проектировании цветографических решений визуализации ДВО.

3. Разработан алгоритм конструирования ситуаций ДВО с заданным уровнем сложности при использовании разработанных дополнений модели ИО диспетчера УВД.

4. Разработана аналитическая модель процесса формирования информационного образа ДВО при полихромии объектов управления в средствах ИО диспетчера УВД для формализации функциональных (визуально-когнитивных) процессов при оценке ДВО на конфликтность.

5. Разработан метод полутоновой полихромной визуализации ДВО, который позволяет (в сравнении с монохромной) создать преимущество во времени анализа ее визуальных

элементов до 50%, механико-моторных действий от 17% до 100%, безошибочности до 20% и сократить в среднем на 21,8% количество информации первоначального образа ДВО.

6. Предложены способы применения метода полутоновой полихромной визуализации ДВО в средствах ИО диспетчера УВД, улучшающие его ситуационную осведомленность:

- способ полихромного отображения ДВО с хроматической стереоскопией высот ВС для сокращения времени обнаружения ПКС на маршруте в среднем на 25,8%;

- полихромное отображение ДВО, которое устраняет нагромождение элементов ДВО при высокой плотности ВД;

- разработан вид окна ПКС, устраняющий недостатки существующего аналога;

- разработан способ представления диспетчеру УВД вариантов решений ПКС.

Полученные результаты использованы в разработке и внедрении в КСА УВД системы оперативной оценки ДВО «Скроллинг» для проведения последующих производственных испытаний и проведении семинаров в службе воздушного движения Минского центра УВД, кафедрах Белорусской государственной академии авиации и Института повышении квалификации и переподготовки, Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Пономарев, К.Ю. Метод полутоновой полихромной визуализации элементов динамической воздушной обстановки для улучшения ситуационной осведомленности диспетчера УВД // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2023. – №1 (38). – С. 98-107.

2. Пономарев, К.Ю. Методологические основы разработки визуально-когнитивных средств оптимизации управления воздушным движением / К.Ю. Пономарев, А.А. Соколовский // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2018. – №2 (15). – С. 23-31.

3. Пономарев, К.Ю. К оптимизации управления воздушным движением при развитии визуально-когнитивной составляющей /Г. А. Крыжановский, К. Ю. Пономарев, М. В. Тимошко // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2018. – Т. 21, №03. – С. 16-24.

4. Пономарев, К.Ю. Оценка влияния хроматизма на формирование первоначального образа динамической воздушной обстановки // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2017. – №1 (14). – С. 59-70.

5. Пономарев, К.Ю. Человеческий фактор в организации воздушного движения // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2016. – №3 (12). – С. 65-77.

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Республики Беларусь:

6. Пономарев, К.Ю. О своевременности действия средств поддержки принятия решений при управлении воздушным движением / В. А. Дубовский, К. Ю. Пономарев, Р. А. Вишневский // Авиационный вестник. – 2021. - №5. – С. 45-50.

7. Пономарев, К.Ю. Экспериментальные исследования интерфейса, разработанного с использованием методики синтеза информационной модели на автоматизированном рабочем месте диспетчера управления воздушным движением / О. А. Капцевич, Д. И. Рабченок, К. Ю. Пономарев // Доклады БГУИР. – 2019. – № 7-8. – С. 149–156.

Публикации в других изданиях:

8. Пономарев К. Ю. Способы устранения потенциально-конфликтных ситуаций невыявленного типа при управлении воздушным движением / А.А. Акуленко, К.Ю. Пономарев, Ю.А. Бай // Сборник материалов III международной научно-практической конференции УО БГАА. «Авиация: история, современность, перспективы развития». – Минск: БГАА, 2018. – С. 4-8.

9. Пономарев, К.Ю. Цветографические решения человеко-машинных интерфейсов для рациональной деятельности диспетчера по управлению воздушным движением // Материалы всеросс. научн.-практ. Конф. ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук. – Спб.: Изд-во Инст-та проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН, 2018. – С. 68-72.

10. Пономарев, К.Ю. Исследование возрастных предпочтений факторов мотивации специалистов по обслуживанию воздушного движения // Научный журнал. – М.: Изд-во «Проблемы науки», 2018. – С.11-20.

11. Пономарев, К.Ю. Цветное эшелонирование // Сборник материалов II межд. мол. научн. конф. «Гражданская авиация: XXI век». – Ульяновск: УВАУ ГА, 2010 г. - С.182-185.

12. Пономарев, К.Ю. Психологические аспекты внедрения глобальной аэронавигационной системы будущего в управлении воздушным движением // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сборник тезисов докладов IV межд. научн.-практ. конф. курс., студ. и слуш.. -Минск: КИИ МЧС Республики Беларусь, 2007. – С.261-263.

Печатается в авторской редакции.
Подписано к печати 24.04.2023. Формат бумаги 60x90 1/16.
Тираж 100. Уч-изд.л. 1,5. Усл.печ.л. 1,5. С 24. Заказ 340.
Тип. Университета ГА. 196210 С.-Петербург, ул. Пилотов, д. 38