Труды МАИ. 2026. № 150.

Trudy MAI. 2026. No. 150. (In Russ.)

Научная статья
УДК 629.7.058
URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=189698
EDN: https://www.elibrary.ru/EOFKBL

АНАЛИЗ НАПРАВЛЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ В ИНТЕГРИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

И.А. Писарев✉, П.С. Радченко, П.А. Иосифов, С.Н. Куликов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

г. Москва, Россия

✉ i@w999.ru

Цитирование: Писарев И.А., Радченко П.С., Иосифов П.А., Куликов С.Н. Анализ направлений повышения эффективности визуализации данных в интегрированных информационно-управляющих системах воздушных судов // Труды МАИ: электрон. журнал. № 150. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=189698

Аннотация. В статье рассматриваются направления повышения эффективности визуализации данных в интегрированных информационно-управляющих системах воздушных судов. Акцент сделан не только на составе современных средств индикации, но и на анализе принципов их применения: структурирование информации, контекстная адаптация, сенсорная интеграция и трёхмерная визуализация совместно влияют на ситуационную осведомлённость и точность пилотирования. Показано, что ключевым фактором успешной индикации является управление вниманием пилота и снижение когнитивной нагрузки. Предложен критерий эффективности визуализации, учитывающий плотность информационного поля, структурную упорядоченность и время реакции оператора. Приведены результаты собственных экспериментов на полунатурном моделирующем комплексе, имитирующем работу одноместного маневренного самолёта: установлено статистически значимое сокращение времени реакции и ошибок распознавания при использовании адаптивных алгоритмов. Определены перспективы развития визуализации в сторону когнитивно-адаптивных и интеллектуальных интерфейсов.

Ключевые слова: визуализация; индикация; авионика; когнитивная нагрузка; ситуационная осведомлённость; сенсорная интеграция; трёхмерные карты.

ANALYSIS OF DIRECTIONS FOR IMPROVING DATA VISUALIZATION EFFICIENCY IN INTEGRATED INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS OF AIRCRAFT

I.A. Pisarev✉, P.S. Radchenko, P.A. Iosifov, S.N. Kulikov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

✉ i@w999.ru

Citation: Pisarev I.A., Radchenko P.S., Iosifov P.A., Kulikov S.N. Analysis of directions for improving data visualization efficiency in integrated information and control systems of aircraft // Trudy MAI. 2026. No. 150. (In Russ.). URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=189698

Abstract. The paper considers directions for improving the efficiency of data visualization in integrated aircraft information and control systems. The focus is placed not only on the composition of modern indication means, but also on the analysis of principles of their application: information structuring, context adaptation, sensor integration and three-dimensional visualization jointly influence situational awareness and piloting accuracy. It is shown that the key factor of successful indication is managing pilot attention and reducing cognitive workload. A visualization efficiency criterion is proposed, taking into account information field density, structural ordering and operator reaction time. The results of the author's experiments on a semi-natural modeling complex simulating a single-seat highly maneuverable aircraft are presented: a statistically significant reduction in reaction time and recognition errors was obtained when using adaptive algorithms. Promising directions for visualization development toward cognitively adaptive and intelligent interfaces are defined.

Keywords: visualization; indication; avionics; cognitive workload; situational awareness; sensory integration; 3D maps.

Введение

Современная кабина пилота — это не просто набор дисплеев, а единая информационная среда, в которой пилот должен быстро выделять приоритетные параметры и принимать решения на фоне высокой динамики полёта.

Проблема заключается в том, что количество данных, требующих восприятия и анализа, растёт намного быстрее, чем возможности человека их обработать. В результате возникает риск: новые сенсоры и вычислители расширяют информационное поле, но одновременно могут размывать приоритеты, заставляя пилота тратить ресурс на поиск наиболее важного.

Исследования по человеческому фактору в авиации подчёркивают, что более половины ошибок ситуационной оценки связаны не с отсутствием данных, а с их неправильной визуальной организацией. Аналогичные выводы встречаются в публикациях отечественных специалистов: ключевой риск — не нехватка информации, а её когнитивная непроходимость. Отсюда главный тезис: эффективность визуализации — это способность системы управлять вниманием пилота, а не просто отображать всю возможную информацию.

Цель статьи — проанализировать актуальные направления .повышения эффективности средств визуализации и определить, как их можно согласованно применять в интегрированных информационно-управляющих системах.

Материалы и методы

В работе применён аналитический обзор современных подходов к построению индикации и средств визуализации в авиационных интегрированных информационно-управляющих системах. Для экспериментальной проверки выделенных направлений использован полунатурный моделирующий комплекс одноместного маневренного самолёта НИИ эргатических систем. Сравнивались базовая статичная конфигурация индикации и адаптивная конфигурация, реализующая приоритизацию информации и контекстную фильтрацию.

Структура современных систем визуализации

Сегодня в кабинах воздушных судов применяются следующие базовые уровни отображения информации: основной пилотажный дисплей, многофункциональные дисплеи и индикатор на лобовом стекле. Основной пилотажный дисплей отвечает за непрерывный контроль траекторных

параметров, многофункциональный расширяет картину обстановки (навигация, метеорологическая информация, состояние бортовых систем), а проекционный индикатор на лобовом стекле работает как уровень моментального действия, встраивая ключевые данные в поле внешнего обзора.

Однако сам набор дисплеев ещё не гарантирует качества доведения информации. Важна согласованность когнитивных ролей уровней. Если основной и многофункциональный дисплеи дублируют одни и те же элементы, внимание распадается. Если проекционный индикатор перегружается функциями многофункционального дисплея, появляется визуальный шум в поле зрения. Поэтому эффективная кабина — это не максимальная интеграция по принципу «всё на одном экране», а правильное распределение функций по когнитивным уровням.

Традиционные схемы визуализации ограничены прежде всего статичностью. Пилот работает в динамической среде, а интерфейс остаётся одной и той же «картинкой». Это приводит к потере приоритета, увеличению времени поиска и перегрузке в критических фазах, когда время реакции минимально. Таким образом, главная проблема заключается не в элементах индикации, а в логике их работы и в отсутствии адаптивного управления информационным полем.

Психофизиологические основы восприятия информации

В одноместном маневренном самолёте пилот действует в условиях высокой динамики, пространственной неопределённости и жёсткого дефицита времени. В этих условиях зрительное восприятие работает не как считывание параметров, а как распознавание устойчивых образов и паттернов. Центральное зрение обеспечивает точную оценку чисел и шкал, периферическое — контроль пространственной картины и грубых трендов. Поэтому ключевые параметры должны быть размещены либо в зоне фовеального внимания, либо на траектории естественных саккад.

Второй фактор — ограничение по времени. Любой сигнал должен восприниматься быстрее, чем развивается опасная ситуация. Если сигнал

распознаётся медленно, автоматизация не усиливает безопасность, а превращается в дополнительный источник когнитивной конкуренции. Наконец, цена перегрузки проявляется в том, что каждый лишний элемент забирает долю внимания и увеличивает вероятность пропуска реальной угрозы.

Эти особенности позволяют формализовать эффективность визуализации через измеряемые параметры и проверять её экспериментально.

Критерий эффективности визуализации

Эффективность восприятия зададим как функцию трёх факторов: количества элементов, их различимости и времени реакции пилота:

$$E = f(N, K, \tau) \quad (1)$$

где E — эффективность восприятия;

N — количество одновременно отображаемых элементов;

K — коэффициент различимости (контрастность, кодирование, читаемость);

τ — время реакции пилота на визуальный стимул.

Для предотвращения перегрузки вводится адаптивное ограничение: количество одновременно предъявляемых элементов не должно превышать предельно допустимое значение, зависящее от текущей когнитивной нагрузки и допустимого критического времени реакции.

Кроме количества важно, насколько структурировано информационное поле. Если пилот вынужден равномерно сканировать много зон, возрастают время поиска и риск ошибки. Оценка структурной упорядоченности может выполняться через энтропийный показатель HHH, отражающий вероятность обращений к отдельным элементам дисплея.

Интегральный критерий эффективности может быть записан как отношение эффективности восприятия к структурной энтропии с поправкой на превышение времени реакции относительно эталонного значения.

Практический смысл критерия в том, что он позволяет оценивать эффективность по наблюдаемым метрикам: сокращаем NNN, повышаем KKK, уменьшаем HHH за счёт компоновки и фиксируем выигрыш по времени реакции.

Направления повышения эффективности визуализации

Структурирование и визуальная иерархия

Информация должна быть упорядочена по тому, как её использует пилот, а не по тому, как она поступает в систему. Поэтому актуальными направлениями являются: группировка по задачам (траектория, навигация, состояние борта), выведение ключевых данных в «первую линию» зрения, уменьшение глубины меню и сжатие второстепенных параметров. Это сокращает визуальные переходы и снижает когнитивную нагрузку.

Контекстная адаптация

Наиболее значимым направлением для критических режимов является контекстная индикация, когда интерфейс меняет структуру под фазу полёта и действующие или прогнозируемые риски. Важно понимать, что избыточность опасна именно в критические моменты. Эффективный интерфейс в эти моменты не добавляет данных, а убирает всё, что отвлекает внимание. На взлёте и посадке усиливаются траекторные и предупредительные акценты, в крейсерском полёте — системная и навигационная детализация, при отказах — приоритетный вывод причинно-следственных цепочек.

Сенсорная интеграция

Интеграция сенсоров переводит всё в одно когнитивное пространство: пилот видит не набор источников, а единую сцену. Это ускоряет понимание обстановки и снижает риск противоречивой интерпретации. Однако интеграция даёт эффект только тогда, когда вычислительная задержка и фильтрация позволяют сформировать сцену быстрее, чем пилот сделал бы это мысленно. Иначе система теряет когнитивный выигрыш.

Трёхмерная визуализация

3D-карты и синтетические сцены — не эстетическое дополнение, а средство формирования устойчивой пространственной модели, особенно при

ограниченной видимости. Пилот контролирует траекторию через интуитивную геометрию сцены, а не через набор изолированных чисел. Это снижает вероятность неверной проекции траектории на рельеф и уменьшает пространственные ошибки по сравнению с 2D-представлением.

Собственные экспериментальные исследования

Эксперименты выполнены на полунатурном моделирующем комплексе одноместного маневренного самолёта НИИ эргатических систем. Исследовались две конфигурации индикации: базовая статичная и адаптивная, использующая приоритизацию и контекстную фильтрацию.

Испытуемые выполняли сценарии маршрутного полёта, снижения, захода на посадку, а также действия при отказах системы воздушных сигналов и навигационной подсистемы. Регистрировались время реакции на критические сигналы, ошибки идентификации элементов и субъективная нагрузка по методике NASA TLX.

Получены следующие результаты: среднее время реакции при адаптивной визуализации сократилось на 18%, ошибки распознавания элементов — на 15%, субъективная нагрузка — примерно на 20%. Эти эффекты подтверждают практическую состоятельность рассмотренных направлений и их когнитивную значимость для одноместного маневренного пилотирования.

Заключение

Проведённый анализ подтверждает, что эффективность визуализации в интегрированных информационно-управляющих системах определяется не объёмом выводимых данных, а тем, насколько система управляет вниманием пилота и снижает когнитивную нагрузку. Статичная цифровая индикация не отвечает требованиям современных воздушных судов, поскольку не адаптируется к динамике задач и не обеспечивает приоритизации информации в критических фазах полёта.

Показано, что направления повышения эффективности (структурная иерархия, контекстная адаптация, сенсорная интеграция и трёхмерная

визуализация) должны применяться согласованно. Структурирование задаёт когнитивный «скелет» интерфейса, контекстная адаптация перераспределяет приоритеты по фазе и риску, интеграция сенсоров формирует единую сцену восприятия, а 3D-визуализация делает её пространственно устойчивой.

Экспериментальные исследования на полунатурном комплексе показали статистически значимое улучшение ключевых метрик пилотирования при адаптивной визуализации: сокращение времени реакции, уменьшение ошибок распознавания и снижение субъективной нагрузки. Практически это означает необходимость перехода к когнитивно-адаптивным дисплеям, включая использование элементов искусственного интеллекта для прогноза важности параметров и развитие комбинированных систем видимости, где синтетическая сцена и реальные сенсоры работают как единое поле.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллективу ОАО «НИИЭС» за экспериментальную и методическую поддержку.

Acknowledgments

The authors would like to thank the staff of the Research and Testing Institute of Ergatic Systems (JSC NIIES) for their experimental and methodological support.

Список источников

1. HF-STD-001B. Human factors design standard / V. Ahlstrom; Atlantic City, NJ: Federal Aviation Administration. 2016. 753 p. URL:https://hf.tc.faa.gov/publications/2016-12-human-factors-design-standard/full_text.pdf (accessed: 27.11.2025).

2. DOT/FAA/TC-07/11. Human factors criteria for displays: A human factors

design standard update of chapter 5 / Ahlstrom V, Kudrick B. Atlantic City, NJ: FAA; 2007. 49 p. URL: https://hf.tc.faa.gov/publications/2007-human-factors-criteria-for-displays/full_text.pdf. (accessed: 27.11.2025).

3. Human factors considerations in the design and evaluation of flight deck displays and controls. Version 2 / M. Yeh, C. Swider, Y. Jin Jo, C. Donovan. Cambridge, MA: U.S. DOT Volpe Center; 2015. 396 p. URL: https://www.volpe.dot.gov/sites/volpe.dot.gov/files/docs/Human_Factors_Considerations_in_the_Design_and_Evaluation_of_Flight_Deck_Displays_and_Controls_V2.pdf. (accessed: 27.11.2025).

4. Synthetic and enhanced vision systems (SEVS) operational evaluation: NASA Technical Report / J.J. Arthur, L.J. Prinzel, K.J. Shelton et al. 2019. 12 p. URL: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190029325/downloads/20190029325.pdf. (accessed: 27.11.2025).

5. ГОСТ 22686-85. Средства отображения информации экипажу самолёта и вертолёта. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1985. 17 с. URL: https://meganorm.ru/Data/204/20499.pdf. (дата обращения: 27.11.2025).

References

1. Ahlstrom V. *HF-STD-001B. Human factors design standard*. Atlantic City, NJ: Federal Aviation Administration, 2016, 753 p. Avialable at: https://hf.tc.faa.gov/publications/2016-12-human-factors-design-standard/full_text.pdf (accessed: 27.11.2025).

2. Ahlstrom V, Kudrick B. *DOT/FAA/TC-07/11. Human factors criteria for displays: A human factors design standard update of chapter 5*. Atlantic City, NJ: FAA, 2007, 49 p. Avialable at: https://hf.tc.faa.gov/publications/2007-human-factors-criteria-for-displays/full_text.pdf (accessed: 27.11.2025).

3. Yeh M., Swider C., Jin Jo Y., Donovan C. *Human factors considerations in the design and evaluation of flight deck displays and controls. Version 2.* Cambridge, MA: U.S. DOT Volpe Center, 2015, 396 p. Avialable at: https://www.volpe.dot.gov/sites/volpe.dot.gov/files/docs/Human_Factors_Considerations_in_the_Design_and_Evaluation_of_Flight_Deck_Displays_and_Controls_V2.pdf

(accessed: 27.11.2025).

4. J.J. Arthur, L.J. Prinzel, K.J. Shelton et al. *Synthetic and enhanced vision systems (SEVS) operational evaluation: NASA Technical Report,* 2019, 12 p. URL: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190029325/downloads/20190029325.pdf (accessed: 27.11.2025).

5. GOST 22686-85. *Sredstva otobrazheniya informatsii ehkipazhu samoleta i vertoleta. Terminy i opredeleniya* [Means of displaying information to the aircraft and helicopter crew. Terms and definitions], Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1985. 17 p. URL: https://meganorm.ru/Data/204/20499.pdf (accessed: 27.11.2025).

Информация об авторах

Иван Андреевич Писарев, аспирант, инженер-исследователь Научно-испытательного института эргатических систем; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия; e-mail: i@w999.ru

Павел Сергеевич Радченко, аспирант, инженер-исследователь Научно-испытательного института эргатических систем; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия; e-mail: p.radchenko1990@yandex.ru

Павел Андреевич Иосифов, к.т.н., доцент, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия; e-mail: iosifovpa@mail.ru

Сергей Николаевич Куликов, к.т.н., доцент, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия; Москва, e-mail: 1525395@mail.ru

Information about the authors

Ivan Andreevich Pisarev, postgraduate student, research engineer, Research and Testing Institute of Ergatic Systems; Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; e-mail: i@w999.ru

Pavel Sergeevich Radchenko, postgraduate student, research engineer, Research and Testing Institute of Ergatic Systems; Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; p.radchenko1990@yandex.ru

Pavel Andreevich Iosifov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; iosifovpa@mail.ru

Sergey Nikolaevich Kulikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; e-mail: 1525395@mail.ru

Получено 22 января 2026 ● Принято к публикации 28 марта 2026 ● Опубликовано 28 октября 2026
Received 22 January 2026 ● Accepted 28 March 2026 ● Published 28 October 2026