

## ОЦЕНКА НА КОГНИТИВНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ЧОВЕКА-ОПЕРАТОР ПРИ ОБУЧЕНИЕ С ТРЕНАЖОР ЧРЕЗ МЕТОДИТЕ НА АЙТРЕКИНГ (EYE TRACKING)

Деанна Александрова<sup>1</sup>, Любомир Алексиев<sup>1</sup>, Даниела Иванова<sup>1</sup>,  
Зоя Хубенова<sup>2</sup>, Константин Методиев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Катедра „Авиационна и морска медицина“ – ВМА, София

<sup>2</sup>Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките  
e-mail: daleksandrova@yahoo.com

**Ключови думи:** : БЛА, оператор, зрително внимание, Eye tracking, когнитивни функции

**Резюме:** Осъществяването на ефективна и безопасна мисия с безпилотни летателни апарати (БЛА) зависи от индивидуалните когнитивни способности на човека-оператор да възприема, обработва и използва полетната информация и степента до която може да бъде умствено натоварен при извършване на летателната дейност. В статията са представени резултатите от проведените експерименти в ИКИТ-БАН при участието на доброволци с опит в управлението на БЛА в лабораторни условия. Цел на изследването е да се определи оптималното разпределение на зрителното внимание на операторите върху монитора на тренажорния комплекс C-Star (фирма SimLat) с окулограф Pupil Labs Core.

## EVALUATION OF THE HUMAN OPERATOR'S COGNITIVE CHARACTERISTICS DURING A SIMULATOR TRAINING USING EYE TRACKING METHODS

Deanna Aleksandrova<sup>1</sup>, Lyubomir Aleksiev<sup>1</sup>, Daniela Ivanova<sup>1</sup>  
Zoia Hubenova<sup>2</sup>, Konstantin Metodiev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department "Aviation and Maritime Medicine" – Military Medical Academy – Sofia

<sup>2</sup>Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences  
e-mail: daleksandrova@yahoo.com

**Keywords:** UAV, human operator, visual attention, Eye tracking, cognitive functions

**Abstract:** The effectiveness and safety of unmanned aerial vehicles (UAVs) missions depends on the individual cognitive abilities of the human operators to perceive, process and use information, and on the capacity of their mental workload during a flight. The article presents the results of the experiments conducted at IKIT-BAS with the participation of volunteers with experience in the management of UAVs in laboratory conditions. The aim of the study is to determine the optimal distribution of the visual attention of the operators on the monitor of the C-Star training complex (SimLat Company) with the Pupil Labs Core oculograph.

### Въведение

Поддържането на активен зрителен контрол върху полетните параметри гарантира безопасно и ефективно управление на БЛА, но представлява когнитивна дейност с високо ниво на сензорно и умствено натоварване, изискваща ефективно разпределение на зрителното внимание.

Когнитивното натоварване и зрителното внимание не са константна величина - те са в пряка връзка с ролята на оператора в летателния процес и естеството на изпълняваните задачи в отделните етапи на полета. Подобно на управлението на самолетите с пилот на борда [1], работното натоварване на операторите на БЛА не е разпределено равномерно по време на полета, като се очаква висока степен на умствена активност на човешкия елемент в етапите на

излитане и приземяване. Ако има и вторична задача за изпълнение (например освобождаване на полезния товар), операторът ще бъде сензорно и когнитивно натоварен с приближаване на точката, в която трябва да вземе решение и да реализира допълнителната задача [2].

Измерването на когнитивното състояние на човешкия елемент все още е трудна задача за изследователите. Вече е установено, че регистрирането на очните движения на операторите чрез съвременни окулографски методи по време на реален или симулиран полет, може да осигури директно измерване на обективни зрителни параметри, които дават ценни данни за *когнитивното натоварване на оператора* [3], *зрителното внимание и неговото разпределение* в различните етапи на полета, както и за начина, по който човек възприема, обработва и използва полетната информация при реализиране на летателните задачи [1,4].

Основните физиологични характеристики на зрителната активност, които са свързани с оперативните способности на летателните екипажи при управление на пилотирувани и безпилотни платформи включват сакади и фиксации, плавни очни движения при преследване на подвижен зрителен стимул, честота на мигания, диаметър на зениците [3,4]. Сакадите са бързи мощни очни движения, чрез които погледът се премества от една област на зрителното поле и се насочва към друга. Фиксацията на очите е краткотрайно единично задържане на погледа в определена позиция, ограничено от двете страни от бързи очни движения – сакади или мигания. Докато очните сакади са необходими за бързото преместване на погледа в пространството (от една област към друга), физиологичният смисъл на фиксациите е да се осигури перцепция на образите и да се извлече зрителната информация от наблюдаваната зона.

### **Пилотно проучване с оператори на БЛС при симулиран полет**

Изхождайки от литературните данни и разбирането, че фиксациите дават представа за когнитивното натоварване и зрителното внимание, обработката на зрителната информация и подбора на информацията от пилотажните прибори [1,4,5], който авиаторите правят при различни полетни режими в пилотираната авиация, в проучването, което представяме, насочихме усилията за измерване и анализ на очните фиксации по брой, продължителност и локализация (зони на интерес).

Целта на изследването беше с възможностите на окулографските методи да бъде изследвано и анализирано зрителното поведение при управление на БЛА от оператори с различно ниво на подготовка и опит при работа на симулатор.

*Пилотното проучване* се реализира в „Лаборатория за подготовка, обучение и контрол на оператори на безпилотни летателни апарати“, секция „Аерокосмически системи за управление“ в Институт за космически изследвания и технологии (ИКИТ–БАН) по съвместен проект с ВМА, финансиран по договор от Фонд „Научни изследвания“.

*Контингент.* В пилотното проучване взеха участие общо 9 доброволци, от които 6 участника с опит при управление на БЛА и 3 – без никакъв или почти никакъв опит в тази сфера. В настоящото изложение сме представили получените окулографски данни на оператор-експерт (инструктор), които данни са основа за разработване на полети-еталони и в по-следващ етап използвани като стандарти за сравнение и динамичен контрол в процеса на обучение.

*Работното място на оператора* включва (Фиг. 1): 1)Тренажор C-Star на израелската фирма SimLat, който създава виртуална среда за симулиране на полети, наподобяваща реалната; 2) Мобилен окулограф Pupil Labs Cor (Pupil Labs, Германия) и стационарен окулограф GazePoint GP3HD (Канада) за регистриране на очните движения на участниците в изпитването; 3) Таблет Samsung Galaxy Tab S5e и Компютър Intel® Core™ i7-4770K @ 3.5 GHz – за записване на данните от окулографа, след което се експортират към програмата Pupil Player за по-нататъшна обработка.

*Задачата*, която участниците трябваше да изпълняват, е “Управление на БЛА по зададена траектория” – полет по кръга при прости метеорологични условия, условно разделена на *три етапа - излитане, полет по кръга и кацане*, със 7 маршрутни точки на контрол по отношение на височина, посока, скорост, пространствено разположение на летателния апарат, отчетени по данните от навигационно-пилотажните прибори (компас, скоростомер и висотомер), представени на дисплея на симулатор C-Star на фирма SimLat (Фиг. 1).



Фиг. 1. Дисплей на тренажора: 1. Маршрутна карта с 7-те маршрутни точки; 2. Видео-канал; 3. Условни данни от навигационно-пилотажните уреди; 4. Информация за полетните системи

При анализа на зрителното поведение на операторите на БЛА следвахме стандартния подход, при който работното поле се разделя на различни *зони на интерес*. В конкретния случай екранът на тренажора е разделен на четири зони: 1) Карта, 2) Видео-канал, 3) Пилотажни прибори, 4) Сензори (фиг. 1).

Изчислихме процентното съотношение между сбора от продължителността на всички фиксации върху една зона на интерес, за всеки етап поотделно в секунди, разделено на общата продължителност на всеки етап от полета в секунди ( $PDT'$ , формула 1):

$$(1) \quad PDT' = \frac{\text{сбор от продължителността на всички фиксации върху една зона на интерес (s) за определен етап}}{\text{обща продължителност на съответния етап в (s)}} \%$$

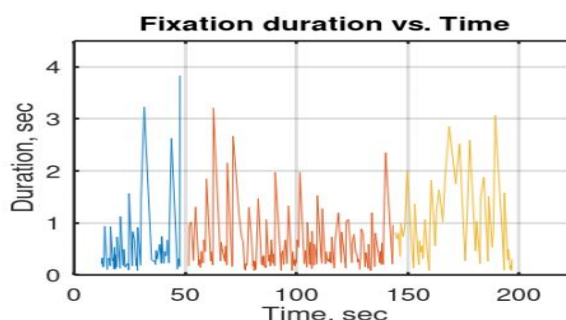
Предложената метрика  $PDT'$  представлява модифицирана версия на Proportional dwell time ( $PDT$ ) [4], използвана в проучванията, проведени в пилотираната авиация [1,6], която изразява процентното съотношение на времето на задържане на погледа върху една зона на интерес (продължителност на фиксациите или dwells в зависимост от разделителната способност на очния тракер) спрямо времето на сканиране на всички зони на интерес.

В посочената по-горе формула в знаменателя е използвана продължителност на съответния етап от полета. Изчислената по този начин метрика  $PDT'$  дава представа за *процентното разпределение на зрителното внимание* на оператора върху отделните зони на интерес за всеки етап от полета и предлага възможност за оценка на времето, в което операторът не сканира зоните на интерес. От когнитивна гледна точка това се определя като „неефективно време“ (НЕВ), тъй като не се осъществява когнитивна обработка на полетна информация.

### Резултати от изследването

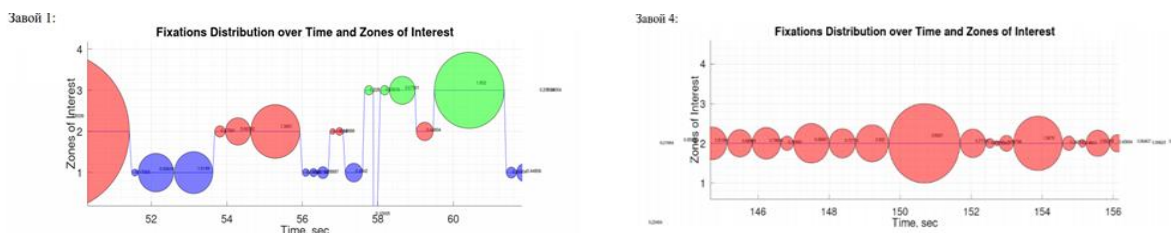
Таблица 1. Данни за фиксациите по брой, честота и средна продължителност по етапи от полет на инструктора

Етап / Параметър	Брой фиксации	Брой фиксации в една секунда, $\text{sec}^{-1}$	Средна продължителност на фиксациите в ms	Стандартно отклонение, ms
Етап 1 (12.1s – 50.6s)	68	1.7661	513.5102	81.0085
Етап 2 (50.6s – 144.296s)	176	1.8784	488.4669	37.2435
Етап 3 (144.3s – 197.54s)	61	1.1456	837.2308	51.0711



Фиг. 2. Окулографски данни за разпределението на фиксациите по етапи при полет на инструктора

На Фиг. 2 графично представяме окулографските данни от същия полет на оператора-експерт, под формата на диаграма с разпределение на фиксациите по брой и продължителност в отделните етапи на полета, оцветени както следва: Етап 1 (излитане) – в синьо; Етап 2 полет по кръга – в червено; Етап 3 (приземяване) – в жълто



Фиг. 3. Разпределение на зрителното внимание на оператора по зони на интерес при завой 1 и завой 4, съобразно тяхната продължителност.

На Фиг. 3 под формата на кръгови диаграми демонстрираме разпределението на зрителното внимание на оператора в два сравнително кратки, но важни момента от същия полет – изпълнение на завой 1 и завой 4, на базата на осъществените фиксации по зони на интерес и по продължителност. Зоните на интерес са оцветени както следва: зона 1 – „Карта“ в синьо; зона 2 – „Видео канал“ в червено; зона 3 – „Прибори“ в зелено; зона 4 – „Сензори“ в жълто. По-големият диаметър на кръга съответства на по-голяма продължителност на фиксациите в съответната зона на интерес.

Прави впечатление разликата в зрителното поведение на оператора-експерт при изпълнение на двата завоя. Моделът на разпределение на зрителното внимание е резултат от естеството на полетните задачи, които операторът изпълнява. В първия случай при *завой 1* той осъществява завой в определена маршрутна точка, на определена височина и с определена скорост, проследявайки движението и позицията на безпилотния самолет. Необходимите данни за полетната информация получава от: видео-канала (относно движението на БЛА), от картата (позициониране на БЛА върху картата спрямо маршрутните точки), полетните прибори (данни за височина и скорост). Във втория случай при *завой 4* – задачата е заход за кацане и приземяване, която изисква проследяване движението на летателното средство спрямо пистата, което операторът осъществява „по земни ориентири“ чрез видео-канала, на базата на изработен усет за снижение и кацане, без информация от приборите (представа от натрупан опит от предшестващи полети).

### Окулографски данни от проведените 10 полета на оператора-експерт

Таблица 2. Окулографски данни за Етап 1, 2 и 3: продължителност на етапите в секунди, изчислено общо време на фиксациите по етапи и процентно съотношение (PDT). М (mean) представя средноаритметичните стойности на параметрите от 10 полета.

	Продължителност на етапа (s)	Общо време на фиксациите (s)	Общо време на фиксациите като % от общата продължителност на етапа (PDT')	Време извън фиксациите (s)	Време извън фиксациите в %
<b>Етап 1</b>	M = 37.72 s	M = 33.78 s	<b>M = 89.55%</b>	M = 3.94 s	M = 10.42%
<b>Етап 2</b>	M = 95.59 s	M = 87.04 s	<b>M = 91.06%</b>	M = 8.55 s	M = 8.95%
<b>Етап 3</b>	M = 52.33 s	M = 49.99 s	<b>M = 95.51%</b>	M = 2.34 s	M = 4.48%

От окулографските данни от 10-те полета е видно, че най-активно операторът-експерт проследява полетната информация в Етап 3 (PDT' = 95.51%), който се очертава като най-натовареният етап от когнитивна гледна точка. Приблизително в 5-10% от полетно време не е осъществявана когнитивна обработка на полетна информация, тъй като операторът не е сканирал зоните на интерес.

Таблица 3. Разпределение на фиксациите по брой, продължителност и зони на интерес, осъществени от инструктора в Етап 1 (M = средноаритметични стойности от 10 полета, PDT' - изчислено % съотношение)

	Брой фиксации в Етап 1	Продължителност на фиксациите (s), Етап 1	PDT' % Етап 1
Карта	M = 8.7	M = 2.75 s	M = 7.33%
Видео-канал	M = 47.8	M = 19.96 s	M = 52.94%
Прибори	M = 22.8	M = 10.27 s	M = 27.20%
Сензори	M = 3.8	M = 0.79 s	M = 2.10%
НЕВ	-	M = 3.94 s	M = 10.42%

Окулографските данни в Етап 1 (етап на излитане) от 10-те полета на оператора-експерт показват, че най-голям процент от времето операторът отделя за сканиране на Видео-канала (PDT'=52.94%), на второ място - на полетните прибори (PDT'=27.20%). Водещо значение при изпълнение на летателните задачи в етапа на излитане е информацията, постъпваща по Видео-канала, необходима за проследяване движението и ориентацията на безпилотния самолет. На второ място по значение е информацията от пилотажните прибори с данни за височината и скоростта на летателното средство в този етап на полета.

Таблица 4. Разпределение на фиксациите по брой, продължителност и зони на интерес, осъществени в Етап 2 (M = средноаритметични стойности от 10 полета, PDT' - изчислено % съотношение)

	Брой фиксации в Етап 2	Продължителност на фиксациите (s), Етап 2	PDT' % Етап 2
Карта	M = 54.6	M = 18.43 s	M = 19.19 %
Видео-канал	M = 107.3	M = 43.54 s	M = 45.52 %
Прибори	M = 44.09	M = 23.72 s	M = 24.84 %
Сензори	M = 5.9	M = 1.44 s	M = 1.51 %
НЕВ	-	M = 8.55 s	M = 8.95 %

В Етап 2 – полет по кръга се наблюдава повишаване ролята на информацията от картата (от 7.33% за Етап 1 на 19.19 % за Етап 2). След проведен статистически тест на Студент (t-test), се установява статистически значима разлика ( $p < 0.05 / 0.000051$ ). Повишена стойност на PDT' за картата в Етап 2 е причинена от предстоящата задача - изпълнение на завой 1, 2 и 3 от маршрута на полета и необходимостта от позициониране на летателния апарат върху картата спрямо маршрутните точки от полета, в които трябва да се достигнат определена височина и скорост на летателното средство. Водещо значение за оператора и в този етап има Видео-каналът, с известно намаление от 52.94% за Етап 1 на 45.52% за Етап 2 (статистически значима разлика,  $p < 0.05 / 0.0085$ ). Данните за продължителността на фиксациите върху зона на интерес – Прибори, запазват близки стойности: 27.20% (Етап 1) и 24.84 % (Етап 2), при които е налице статистически незначима разлика ( $p > 0.05 / 0.3308$ ).

Таблица 5. Разпределение на фиксациите по брой, продължителност и зони на интерес, осъществени в Етап 3 (M = средноаритметични стойности от 10 полета, PDT' - изчислено % съотношение).

	Брой фиксации в Етап 3	Продължителност на фиксациите (s), Етап 3	PDT' % Етап 3
Карта	M = 2.6	M = 0.67 s	M = 1.29 %
Видео-канал	M = 62.5	M = 47.46 s	M = 90.72 %
Прибори	M = 3.6	M = 1.34 s	M = 2.56 %
Сензори	M = 1.8	M = 0.49 s	M = 0.95 %
НЕВ	-	M = 2.34 s	M = 4.48 %

В Етап 3 – заход за кацане и приземяване, зрителното внимание на оператора е концентрирано върху Видео-канала, като се наблюдава нарастване на PDT за тази зона на интерес от 45.52% (в Етап 1) на 90.72% (Етап 2), поради необходимостта да бъде проследявано

движението на безпилотния самолет спрямо пистата при неговото приземяване. Окулографските данни демонстрират повишеното значение на информацията от Видео-канала в етапа на кацане. Ролята на картата (PDT'=1.29%), пилотажните прибори (PDT'=2.56%) и сензорите (PDT'=0.95%) е сведена до минимум. Лимитиращ фактор за изследването е автоматичният режим на работа на двигателя, което не изисква активно наблюдение на сензорните системи и обяснява ниския процент на сканиране на тази зона на интерес в трите етапа на полета (Сензори).

### **Изводи**

От окулографските данни от пилотното проучване можем да направим следните изводи:

1. Разпределението на зрителното внимание на оператора-експерт върху зоните на интерес при изпълнение на 10-те полета се променя приоритетно в зависимост от естеството на летателните задачи, които той изпълнява в отделните етапи на полета.

2. Относителният дял на PDT' е по-висок върху зоните на интерес, които предоставят критично важна информация за конкретната полетна ситуация.

3. Налице е време от полета (4-10% за различните етапи), през което операторът не сканира зоните на интерес. Необходимо е да бъдат проведени допълнителни изследвания, които да валидират предположението, че съществува „неефективно време“, през което не се осъществява когнитивна обработка на полетна информация.

### *Заклучение и дискусия*

Използването на съвременни окулографски методи за изследване на зрителната дейност в контекста на когнитивните функции на мозъка, дава важни данни за обработката на полетната информация и начина, по който операторите използват наличните данни при управлението на летателното средство. Разпределението на зрителното внимание чрез сканиране на зоните на интерес в различните етапи на полета е специфично и зависи от естеството на изпълняваните летателни задачи. Въз основа на окулографските записи, регистрирани при полети на оператори - експерти, могат да бъдат изготвени „полетни еталони“, които да служат за стандарт и динамичен контрол при провеждане на първоначално и периодично обучение на начинаещи и професионалисти оператори на БЛС.

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Представеното изследване е финансирано по договор КП-06/Н27-10/ 11 декември 2018 г., сключен между Фонд „Научни изследвания“ и ИКИТ – БАН.

### **Литература:**

1. Frische, F., J. P. Osterloh, A. Lüdtkе. "Simulating visual attention allocation of pilots in an advanced cockpit environment", In Selected Papers and Presentations Presented at MODSIM World 2010 Conference Expo 2011.
2. Richards D., Kurtulus Izzetoglu, Graham Shelton-Rayner "UAV Operator mental workload - A neurophysiological comparison of mental workload and vigilance".
3. Ellis, K. K. E. "Eye tracking metrics for workload estimation in flight deck operations", University of Iowa, 2009.
4. Mackenzie G. Glaholt, "Eye tracking in the cockpit: a review of the relationships between eye movements and the aviator's cognitive state", Defence Research and Development Canada, Scientific Report - Toronto Research Centre; DRDC-RDDC-2014-R153, December 2014.
5. Ziv, G., "Gaze behavior and visual attention: A review of eye tracking studies in aviation", The International Journal of Aviation Psychology pp. 75–104, 2016.
6. Skvarekova, I., F. Skultely "Objective Measurement of Pilot's Attention Using Eye Track Technology during IFR Flights " Air Transport Department, University of Zilina, May 29-31 2019, Slovakia, Transportation Research Procedia, 40, pp. 1555–1562, 2019.