BULGARIAN ACADEMY OF SCIENCES
SPACE RESEARCH AND TECHNOLOGY INSTITUTE
SES 2026
Twenty-second International Scientific Conference
SPACE, ECOLOGY, SAFETY
20 – 24 October 2026, Stara Zagora, Bulgaria

ВАРИАБИЛНОСТ НА СЪРДЕЧНАТА ЧЕСТОТА – ФИЗИОЛОГИЧЕН ИНДИКАТОР ПРИ ОЦЕНКА НА ОПЕРАТОРСКАТА ЕФЕКТИВНОСТ В ЕКСТРЕМНИ УСЛОВИЯ

Ара Хачмериян
Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: arahachmeriyan@gmail.com

Резюме: *Вариабилността на сърдечната честота (ВСЧ) е неинвазивен показател на автономната регулация, който може да се регистрира в реално време. Обобщени са данни от научни публикации за промените във ВСЧ при космически полет, полет на пилоти, хипоксия и високо когнитивно натоварване, както и възможностите за приложение на изкуствен интелект. Моделите на машинно обучение постигат двукласова точност над 90%, но обобщаемостта им е ограничена. Предложена е концептуална архитектура на семантичен модел с контекст. ВСЧ е ценен компонент на комплексна система от индикатори, но не е достатъчен самостоятелен критерий за операторска ефективност.*

УВОД И ЦЕЛ

- В екстремни условия (космически полет, високо-маневрена авиация, хипоксия) е нужна **обективна, неинвазивна оценка** на състоянието на оператора в реално време [1].
- ВСЧ отразява взаимодействието на симпатиковата и парасимпатиковата система [2], но резултатите от изследванията са **разнородни** [4].
- **Цел:** да се систематизират ограниченията на ВСЧ като самостоятелен индикатор за операторска ефективност и да се предложи контекстно-зависим семантичен модел с изкуствен интелект.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИ

- **Наративен преглед** на рецензирани публикации с отворен достъп (PubMed, PMC, Frontiers, MDPI, Springer, ScienceDirect, Nature).
- Включени: публикации на английски език с количествени данни за ВСЧ при хора в операторска, авиационна, космическа или друга екстремна среда.
- Предпочетени: систематични прегледи, метаанализи, стандарти и изследвания с астронавти и пилоти.

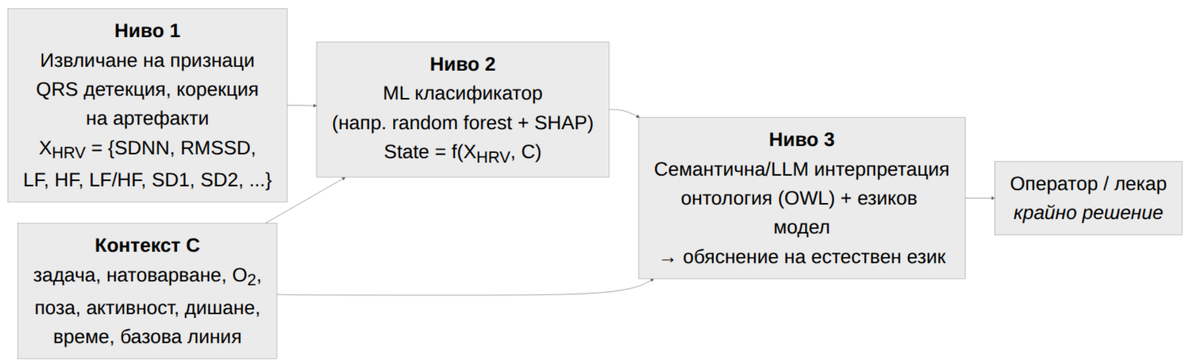
ПОКАЗАТЕЛИ ЗА ВСЧ

Таблица 1. Основни показатели за ВСЧ [2, 8]

Показател	Област	Физиологична интерпретация
SDNN	времева	обща вариабилност; при 24-часов запис – основен показател за сърдечен риск
RMSSD	времева	краткосрочна вариабилност; вагусова активност
pNN50	времева	дял на интервалите с разлика над 50 ms; парасимпатикова активност
VLF	честотна	0,0033–0,04 Hz; спорна интерпретация
LF	честотна	0,04–0,15 Hz; смесено симпатиково и парасимпатиково влияние
HF	честотна	0,15–0,40 Hz; дихателно свързана вагусова активност
LF/HF	честотна	тълкува се като симпато-вагусов баланс; валидността е оспорвана
SD1, SD2	нелинейна	SD1 съответства на RMSSD; SD2 – на дългосрочната вариабилност
SampEn	нелинейна	регулярност и сложност на сигнала

Записите (5 мин, ултракратки, 24 ч) не са взаимозаменяеми [2, 8].

СЕМАНТИЧЕН МОДЕЛ С КОНТЕКСТ



Фиг. 1. Концептуална архитектура на семантичен модел с контекст за анализ на ВСЧ.

(1) X_{HRV} = {SDNN, RMSSD, pNN50, LF, HF, LF/HF, SD1, SD2, SampEn, …}

(2) C = [Task, Workload, O_2, Posture, Activity, Respiration, Time, Baseline]

(3) State = f(X_{HRV}, C)

(4) Performance = g(State, C)

Предложение на автора; не е валидирано експериментално [10, 11, 12].

РЕЗУЛТАТИ

- **Космически полет:** промени в бавните компоненти (ULF ↓ 22–52%; β по-малко отрицателен), без значима промяна на HF и LF [13, 14].
- **Пилоти:** RMSSD ↓ 42–56%, SDNN ↓, LF/HF ↑ [15]; по-високи SDNN и RMSSD – по-добро изпълнение (напр. +21,97 ms SDNN → +37% шансове за успех) [16].
- **Хипоксия и висока натовареност:** SDNN ↓ 13,6 ms (разлика спрямо нормоксия 13,3 ms; $p < 0,0001$) [17].

Таблица 2. Промени във ВСЧ при екстремни фактори

Условие	Участници	Основни данни
Космически полет, ~6 мес. [13]	7 астронавти	β −0,949 срещу −1,163; ULF ↓ 22–52%
Космически полет, ~6 мес. [14]	10 астронавти	обща мощност 154,9 → 532,7 ms²
Военни пилоти [15]	19 изследвания	RMSSD ↓ 42–56%; LF/HF ↑; до 5 ч след кацане
Симулатор A320 [16]	30 пилоти	SDNN 34,1; RMSSD 23,8 ms; LF/HF 5,7
Хипоксия 14% O_2 и висока натовареност [17]	24 участници	SDNN −13,6 ms; разлика 13,3 ms

ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ИЗПОЛЗВАНЕ НА ИЗКУСТВЕН ИНТЕЛЕКТ

- Преглед на 43 публикации [21]: правила, класическо машинно обучение (SVM, k-NN, random forest) и дълбоко обучение (LSTM, CNN); точност 57–100%, при SVM често > 99%.
- При оператори: двукласова точност **> 90%**, но **под 50%** при три класа; най-добри SVM и MLP, индивидуалните модели превъзхождат груповите [4].
- Ограничения: 7–35 участници, две трети в симулатори, неописано валидиране [4]; слаба обобщаемост между хора [12].
- **Семантичен контекст:** OWL онтология + random forest – 97,9% точност (до 99,4%) върху един набор от данни [10]; контекст към езиков модел – до +23,8% [22]; система с GPT-4 – само двучасова пилотна сесия, без защита на личните данни [24]; риск от неверни отговори и проблеми с поверителността [11].
- Нито едно решение не е проверено върху оператори в екстремни условия.

ДИСКУСИЯ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- ВСЧ реагира на натоварване/стрес и на екстремна среда, но отговорът зависи от фактора и показателя: при пилоти и сложни задачи – намалена вариабилност [15, 18]; при космически полет – бавните компоненти [13, 14]. Нито един показател не е чист индекс на симпатикова активност [8].
- Ограничения: малки извадки (5–100, предимно до 35); симулаторни и лабораторни условия; липса на единен критерий за натоварване и ефективност [4, 18, 21].

ИЗВОДИ

- ВСЧ е обективен и неинвазивен показател, но **не е достатъчен самостоятелен критерий** за операторска ефективност.
- Най-обосновано е да е компонент на комплексна система от индикатори с индивидуална калибровка.
- Условия: (1) стандартизиран протокол [2]; (2) индивидуална базова линия; (3) комбиниране с поведенчески и неврофизиологични показатели [19, 20]; (4) валидация на ИИ моделите върху нови участници и реални условия [12, 21].