ISSN: 2336-3630

STŘEDOEVROPSKÝ VĚSTNÍK PRO VĚDU A VÝZKUM

Vol. 2. № 5. 2026



Licencováno pod veřejnou mezinárodní licencí Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0)

STREDOEVROPSKY VESTNiK

PRO VEDU A VYZKUM

Vol. 2. № 5. 2026

Praha, České republika 2026

Multidisciplinární mezinárodní vědecký magazín “**Stredoevropsky vestnik pro vedu a vyzkum**” je registrován v České republice. Státní registrační číslo u Ministerstva kultury ČR: E 21425. Vol. 2. № 5. 2026. str. 156.

Vydavatel:

Publishing house Education and Science s.r.o. IČO : 271 56 877.
Frýdlanská 15/1314 , Praha 8. MS v Praze , oddíl C,vložka 100614

Editorial Board:

Editor-in-Chief –

Datsii O.I., Doctor of Economics, Professor, Honored Worker of Education of Ukraine, President of the PO "Association of Scientists of Ukraine", Kyiv, Ukraine

Deputy Editor-in-Chief –

Ekimov S.V., Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Director of Publishing House Education and Science, Prague, Czech Republic

Romanenko E.O., Doctor of Public Administration, Professor, Honored Lawyer of Ukraine, President of the public scientific organization “All-Ukrainian Assembly of Doctors of Public Administration”, Kyiv, Ukraine

Editorial Board Members:

Shpachuk V.V., Doctor of Public Administration, Professor, Visiting Professor Newcastle University Business School, Newcastle, UK

Levchenko N.M., Doctor of Public Administration, Professor, Research scientist Berlin University of Economics and Law, Berlin, Germany

Khraschevskyi R.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv, Ukraine

Mykolayets D.A., Doctor of Laws, Professor, Kyiv, Ukraine

Ulyanchenko Yu.O., Doctor of Public Administration, Associate Professor, Kyiv, Ukraine

Blyznyuk A.S., Doctor of Public Administration, Professor, Kyiv, Ukraine

Kartashov E.G., Doctor of Public Administration, Professor, Kyiv, Ukraine

Články jsou vyvěšeny v redakci autora. Za obsah a pravopis zaslaných materiálů odpovídají autoři

© Publishing house Education and Science s.r.o., Česká republika, 2026
© Public Organization "Association of Scientists of Ukraine", Ukraine, 2026
© autoři článků, 2026

CONTENT

Danyliuk Ivan

APPLICATION OF CONTAINERIZATION FOR UNIFICATION OF THE DEVELOPMENT ENVIRONMENT IN TEACHING THE C LANGUAGE 5

Horban Hlib, Antipova Kateryna, Falenkova Maryna

ARCHITECTURE OF A WEB-BASED SYSTEM FOR ANALYSING THE TONE AND THEMATIC STRUCTURE OF TEXT DATA 25

Колотило Юлія, Печеряга Світлана

ПЕРЕДЧАСНІ ПОЛОГИ: ФАКТОРИ РИЗИКУ ТА ПРОФІЛАКТИКИ 42

Kremer Iryna, Tymkovych Rostyslav

OPTICAL SENSORS IN DEVICES AND SYSTEMS FOR FUNCTIONAL MONITORING 58

Kudermina Olena, Skakun Iryna

PECULIARITIES OF EMOTIONAL-VOLITIONAL SELF-REGULATION OF POLICE OFFICERS UNDER MARTIAL LAW 71

Nazaruk Viktoriia, Pecheriaha Svitlana

RATIONAL NUTRITION OF WOMEN DURING PHYSIOLOGICAL PREGNANCY 85

Pecheriaha Svitlana, Balan Anastasiia

THE MICROBIOME IN THE DEVELOPMENT OF PRETERM BIRTH: MODERN DIAGNOSTIC AND THERAPEUTIC PERSPECTIVES 99

Андрусяк Марк

МЕХАНІЗМИ ДЕРЖАВНОГО УПРАВЛІННЯ РОЗВИТКОМ КАДРОВОГО ПОТЕНЦІАЛУ СЕКТОРУ БЕЗПЕКИ І ОБОРОНИ В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ: ТРАНСФОРМАЦІЯ ТА ІНТЕГРАЦІЯ СТАНДАРТІВ НАТО 114

Демчук Людмила, Нонік Людмила, Алпатова Оксана, Войналович Ірина

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СТРАТЕГІЙ СТАЛОГО УПРАВЛІННЯ ЛІСОВИМИ РЕСУРСАМИ НА ПРИКЛАДІ ЄС ТА УКРАЇНИ 129

Овсянко Дмитро

ПРОБЛЕМА ПЛАГІАТУ У СТУДЕНТСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ: ПРИЧИНИ ТА ШЛЯХИ ПОДОЛАННЯ 148

Danyliuk Ivan, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics and Information Technologies, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6637-9557

APPLICATION OF CONTAINERIZATION FOR UNIFICATION OF THE DEVELOPMENT ENVIRONMENT IN TEACHING THE C LANGUAGE

Abstract

The article addresses the problem of development environment instability when teaching information technology students to detect memory management errors in the C programming language, where heterogeneous operating systems, divergent library versions and platform-specific tooling collectively erode the practical training time available to instructors and students. The main classes of memory management defects encountered in introductory and advanced systems programming courses are characterised – memory leaks, use-after-free, buffer overflow, double-free and use of uninitialised memory – together with modern detection instruments: Valgrind/ Memcheck and AddressSanitizer for dynamic analysis, Cppcheck for static analysis, and the GDB debugger for interactive investigation of failures. It is shown that in real student groups working on a mixed Linux/Windows/macOS fleet, a significant share of study time is spent on resolving technical environment issues rather than on forming target competencies – a phenomenon known as the “works on my machine” problem. A Docker-based containerisation approach is proposed in which the entire tool environment is described declaratively in a Dockerfile stored alongside the course source code under version control, thus realising the “Infrastructure as Code” principle in the educational context. The three-tier architecture of the solution is described: the

host operating system, a Docker image based on debian:bookworm-slim, and integration with Visual Studio Code via the Dev Containers mechanism, with attention to the security parameters required for GDB inside the container. Specifics of deployment on Linux, on Windows via WSL2 and on macOS via OrbStack are discussed separately, including filesystem performance considerations. A comparative analysis of native and Docker approaches across nine educational criteria – including reproducibility, project isolation, environment versioning and assignment verification complexity – is performed. Practical approbation in a Programming course confirms a fivefold reduction in environment-related instructor consultations and an increase from 47% to 72% in the share of students who successfully configure the complete toolchain at the first session. The approach is recommended as a standard for organising practical work in systems programming courses and creates the basis for automated assignment assessment.

Keywords: C language, memory management, memory leaks, Docker, containerization, Valgrind, AddressSanitizer, Dev Containers, environment reproducibility, WSL2.

Problem statement

The C programming language remains one of the cornerstones of training specialists in software engineering, computer science and applied informatics. The classic textbook by Kernighan and Ritchie [1], which has formed the basis of most university curricula for over three decades, clearly formulates the fundamental principle: in C, the programmer bears full responsibility for allocating and freeing dynamic memory. This property gives the language maximum flexibility and efficiency, making it indispensable in systems programming, operating system kernel development, embedded systems, high-performance computing and modern infrastructure software. At the same time, the absence of automatic memory

management opens a wide class of potential defects: memory leaks, use-after-free, buffer overflows, double-free errors and reads from uninitialised memory. According to industry analyses cited by Seacord [2], the majority of critical security vulnerabilities catalogued by the Common Vulnerabilities and Exposures (CVE) database for systems written in C and C++ are directly attributable to errors in dynamic memory management.

Practical instruction in detecting these errors requires a stable and reproducible toolchain: a GCC or Clang compiler, dynamic analysis tools Valgrind/Memcheck [3] and AddressSanitizer [4], the static analyzer Cppcheck, and the GDB debugger. The problem is that in real student groups, students work in heterogeneous environments: different Linux distributions (Debian 11/12, Ubuntu 20.04/22.04/24.04, Fedora, Arch Linux), as well as Windows and macOS. This leads to discrepancies in the output format of analyzers, incompatibilities between library versions (in particular, libasan6 in Ubuntu 20.04 versus libasan8 in Ubuntu 24.04), differences in default compiler flags, and, as a consequence, significant losses of study time on resolving purely environmental problems unrelated to the subject of the course. This phenomenon, known as the “works on my machine” problem, is especially acute in introductory courses, where students lack the experience to diagnose environmental conflicts and cannot distinguish a bug in their own code from a tool malfunction or a packaging idiosyncrasy of their distribution.

The connection between this problem and important practical and scientific tasks is twofold. First, ensuring the reproducibility of the development environment is a precondition for the reliability of empirical results obtained from any computational experiment, including educational ones – a requirement explicitly recognised in the modern software quality standard ISO/IEC 25010:2023 [5] and, more specifically, in the IEEE 2675-2021 Standard for DevOps [15]. Second, the formation of competencies in handling memory errors

directly affects national cybersecurity, since the bulk of critical infrastructure software, embedded controllers and operating systems continues to be written in C and its derivatives.

Analysis of recent research and publications

Detection and prevention of memory errors in C programs is a research domain with a long and well-developed tradition. The seminal work of Nethercote and Seward [3] on Valgrind described the architecture of a heavyweight dynamic binary instrumentation framework based on shadow memory, which to this day remains the de facto reference instrument for detecting subtle memory errors, including reads from uninitialised memory. The team led by Serebryany [4] from Google proposed AddressSanitizer (ASan) – a fundamentally different approach implemented at the level of compiler instrumentation, providing a slowdown of approximately 2× relative to native execution and immediate diagnostic output at the moment of access violation. Both tools are deeply integrated into modern compilers (GCC and Clang) and are widely used both in industry and in academic instruction. Seacord [2], in a comprehensive treatment of secure coding in C and C++, classifies typical memory management defects from the standpoint of exploitability and provides systematic recommendations for their elimination, which can be directly transferred into the educational process.

The economic perspective on defect detection was systematised by Boehm [6] in the foundational work on software engineering economics. He demonstrated that the cost of fixing defects grows nonlinearly depending on the stage at which they are discovered. This principle applies directly to the educational process: environmental problems identified at the very first session cost far less – in time, motivation and attention – than those that accumulate throughout the semester and degrade the student's perception of the course as a whole. Wilson and colleagues [7], in a study of best practices in scientific computing, separately identify the reproducibility of the computational environment as a key condition for quality

work with code, listing it alongside version control, automated testing and code review – a conclusion that fully applies to the educational context, where the instructor effectively performs the role of “principal investigator” of the educational “experiment”.

The reproducibility problem in computational research has acquired particular acuity in the past decade in connection with the widespread adoption of containerisation technologies. Boettiger [8] proposed Docker as a generic solution to the reproducibility crisis in computational science, demonstrating that container images stored in public registries enable bit-exact reproduction of computational pipelines years after the original publication. Cito and Gall [9] empirically investigated the use of Docker in software engineering research and confirmed its effectiveness as a tool for delivering reproducible experimental environments. Merkel [10], in the original Linux Journal article that effectively introduced Docker to a wide professional audience, described the technology as a means of packaging applications together with their dependencies into lightweight containers that run identically on different operating systems. The Open Container Initiative [11] later formalised the resulting image format and runtime specification, which guarantees long-term portability of the approach.

In the educational context, integration of containerised environments with development tools is supported by the Development Containers specification [12], which standardises the description of the editor-side environment and is implemented by Visual Studio Code, JetBrains products and a number of cloud platforms. The methodological foundations of competency-based curriculum design in computing, including expectations regarding systems-level skills such as memory analysis, are summarised in the joint ACM/IEEE Computing Curricula 2020 framework [13], which explicitly highlights the ability to operate within reproducible engineering environments as a transferable competency.

Despite the considerable body of literature on individual elements of the proposed solution – Valgrind, AddressSanitizer, Docker, Dev Containers – there remains a clearly unsolved part of the general problem: the absence of a holistic, methodically substantiated approach that combines containerisation with editor integration specifically for the task of teaching C memory analysis in a heterogeneous student environment, together with quantitative confirmation of its educational effectiveness. The present article is devoted to filling this gap.

Aim of the article

The aim of this work is to substantiate and describe a Docker-based containerisation approach as a means of unifying the tool environment when teaching memory analysis in C, as well as to provide a comparative analysis of this approach against native installation of the toolchain, to specify the architecture of the proposed solution at the level of an editor configuration and a Dockerfile, to describe the platform-specific aspects of deployment on Linux, Windows and macOS, and to present the results of practical approbation in a real third-year student group. A subsidiary aim is to formulate recommendations for the construction of similar environments for other systems-programming courses and to outline directions for the automation of assignment assessment based on a shared container image.

Presentation of the main material

1. Classification of memory management errors in C

For the purposes of the educational process, we identify the main classes of memory management defects in C, ordered roughly by the difficulty of their diagnosis without specialised tools.

Memory leaks – a situation in which allocated dynamic memory is not freed after its use is complete. During prolonged program execution, this leads to gradual exhaustion of the address space, swapping, and ultimately to the termination of the process by the operating system's out-of-memory killer. This is

the most common class of error among novice programmers, since a program may continue to "work" for a considerable time despite the presence of a leak – short test runs do not expose the defect, and even relatively long executions may complete normally if the process exits before resources are exhausted. Pedagogically, this means that a simple manual test cannot detect a leak; a specialised instrument such as Valgrind/Memcheck is required.

Use-after-free (UAF) – accessing a block of memory after a call to free(). This error is a potential security vulnerability that may allow arbitrary code execution if the freed region is subsequently re-allocated and overwritten by attacker-controlled data, and at minimum leads to unpredictable program behaviour. UAF errors are notoriously difficult to reproduce, since the visible consequences depend on the exact sequence of subsequent allocations.

Buffer overflow / underflow – writing or reading beyond the boundaries of an allocated memory block. This is one of the most dangerous vulnerabilities in system software, with consequences ranging from silent data corruption in adjacent allocations to remote code execution in the case of stack-based overflows. From the pedagogical perspective, the importance of this class is reinforced by the fact that classic exploitation techniques (return-into-libc, return-oriented programming) are built on top of buffer overflow primitives.

Double free – a repeated call to free() for an already freed block, which corrupts the memory allocator's internal data structures and can result either in an immediate program crash or in an exploitable vulnerability of the heap metadata.

Use of uninitialised memory – reading values from variables or memory blocks before their explicit initialisation, which produces undefined behaviour and is the source of intermittent, non-reproducible bugs that depend on the previous content of the memory region.

2. Modern tools for memory analysis

Valgrind/Memcheck. Valgrind is a framework for heavyweight dynamic binary instrumentation, described in detail by Nethercote and Seward [3]. Its key tool, Memcheck, implements the “shadow memory” technique: for each byte of the program's memory, an additional status byte is maintained that tracks the addressability and initialisation state of each bit. Running Valgrind requires only that the program be compiled with the -g -O0 flags:

valgrind --leak-check=full --show-leak-kinds=all ./program

Valgrind detects all five of the mentioned error classes, provides a detailed call stack at the point of each error, and produces a summary HEAP SUMMARY report. An execution slowdown of 10–50× is acceptable for educational programs of moderate size. The pedagogical advantage of Valgrind is its human-readable output, which a student can interpret directly without additional knowledge of the compiler's internals, and its ability to detect uninitialised reads – a class of errors that is invisible to AddressSanitizer.

AddressSanitizer (ASan), developed by the Google team [4], is implemented as compiler instrumentation: when compiled with the -fsanitize=address flag, checks are inserted before every memory access. This results in a slowdown of only ~2× compared to the 10–50× of Valgrind. An important pedagogical advantage of ASan is that the error message appears at the moment the error occurs, indicating the exact source file and line number – in line with the principle of immediate feedback in learning. ASan is particularly effective for buffer overflows and use-after-free, where the prompt and precise diagnostic message significantly accelerates the formation of mental models of memory layout in students.

Both tools are complementary: ASan is more effective for detecting access errors and rapid checking during development, while Valgrind additionally tracks uninitialised values and multithreaded access issues via its Helgrind tool. In the

proposed methodology students learn to use both, switching between them depending on the diagnostic task at hand.

Static analysis: Cppcheck. Cppcheck detects potential errors without executing the program. In the educational context it serves as the first line of code review before the testing stage, allowing obvious errors to be caught at the writing stage. Static analysis is particularly valuable for catching defects on infrequently executed code paths that may escape dynamic analysis if the corresponding test inputs are not exercised. Standards such as MISRA C:2012 [14], although primarily aimed at safety-critical industrial software, illustrate the same general principle of relying on static rule checking to enforce a defined memory and aliasing discipline.

Interactive debugging: GDB. The GNU Debugger remains the principal interactive instrument for stepping through execution, inspecting memory and locating the precise origin of a fault. Modern integrated development environments embed GDB as a back-end and provide a graphical interface over its core functionality. As discussed below, the requirement to use GDB inside a Docker container imposes specific demands on container security configuration, which the proposed methodology takes into account.

3. The reproducibility problem in heterogeneous educational environments

The current edition of ISO/IEC 25010:2023 [5] defines Reliability as one of nine top-level product quality characteristics; its four subcharacteristics – faultlessness, availability, fault tolerance, and recoverability – collectively describe the dependability of a software product without explicitly naming reproducibility as a distinct term. Environment reproducibility is, however, formalised as a first-class engineering requirement by IEEE 2675-2021 [15], the IEEE Standard for DevOps, which mandates that build, package, and deployment environments be defined in a deterministic and traceable manner – a principle that

extends directly to educational toolchains, where the instructor's environment must behave identically on every student machine. Among the key changes in the new edition are the expansion of the quality model to nine characteristics (Safety was added), the renaming of Usability to Interaction Capability, and Portability to Flexibility. In the context of the educational process, reproducibility takes on a practical meaning: the learning environment must deliver the same analysis result for the same source code regardless of which machine the work is performed on – whether belonging to the student, the instructor, or an automated assessment system.

In practice, achieving this property through native installation is complicated by several factors. First, different Linux distribution versions are simultaneously present in a single student group, with non-trivial differences in default compiler flags, glibc versions and packaging conventions. Second, the libasan library – the runtime support component of AddressSanitizer – exhibits noticeable behavioural changes between versions (libasan6 on Ubuntu 20.04 versus libasan8 on Ubuntu 24.04), including the format of error reports and the set of detected sub-classes. Third, the fundamental differences among Linux, Windows and macOS – the three platforms simultaneously present in a typical student group – manifest in incompatible toolchain ecosystems: Valgrind, for instance, has historically lacked first-class support on macOS for recent kernel versions, and on native Windows altogether.

The Wilson et al. study of best practices in scientific computing [7] explicitly recommends pinning the entire computational environment to specific versions and treating it as a versioned artefact. Boettiger [8] further showed that this recommendation, when combined with container technology, allows for reproduction of computational results by independent researchers years after publication. In the educational context, the same principles imply that the

instructor should be able to fix the environment once and have students reuse exactly that environment without redoing the configuration work.

4. Docker as an environment encapsulation mechanism

Merkel [10] described Docker as a technology that allows applications to be packaged together with their dependencies into lightweight containers that run identically on different operating systems. For our purposes, the key property is a deterministic runtime environment: a container image described in a Dockerfile always contains exactly the same packages at exactly the same versions, regardless of the host system. The container image format and runtime are now standardised by the Open Container Initiative [11], which protects long-term investment in containerised tooling against vendor lock-in.

A Dockerfile is a declarative description of the environment – a text file stored in the version control system alongside the project code. This implements the “Infrastructure as Code” principle with respect to the learning environment: the instructor fixes the exact toolset once, and all students receive an identical environment. Critically for the educational use case, this same Dockerfile becomes a self-documenting artefact: any student who reads it can see precisely which compiler version, sanitiser library and analysis tool will be used, eliminating the “hidden curriculum” of undocumented environment expectations.

5. Architecture of the proposed Docker-based learning environment

The proposed solution consists of three tiers (Fig. 1).

Tier 1. Host system – any OS: Linux, Windows 10/11, or macOS. Requires only Docker Engine (or a compatible runtime) and Visual Studio Code. The host system retains its own user-level tools, browsers and document editors; Docker introduces no global modifications to the host's package manager state.

Tier 2. Docker image based on debian:bookworm-slim with a fixed toolset: GCC 12, GDB 13, Valgrind 3.19, AddressSanitizer (libasan8), Cppcheck 2.10.

The image is described by a Dockerfile stored in the .devcontainer/ directory of the course repository, alongside the source code of practical assignments.

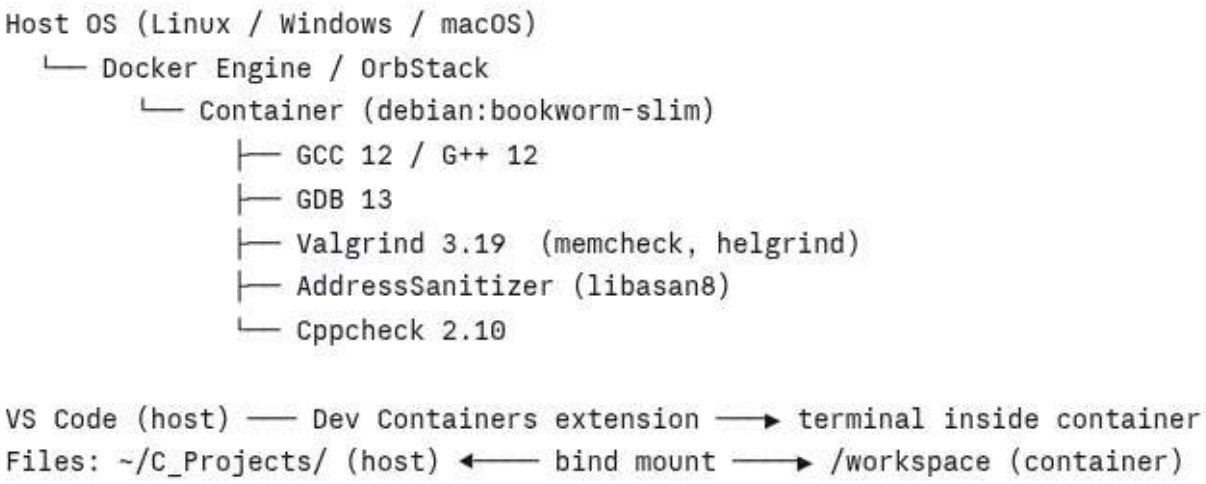


Figure 1 – Architecture of the Docker-based learning environment

The choice of debian:bookworm-slim as a base is motivated by its small footprint (under 80 MB before tool installation), its long support cycle, and its precise correspondence to the Debian/Ubuntu family that students most commonly use natively.

Tier 3. Development environment. VS Code connects to the container via the Dev Containers extension [12], providing the student with the familiar editor interface with all tools running inside the container. Project files are stored in the home directory of the host system (~/C_Projects/) and mounted into the container via the bind mount mechanism, ensuring data persistence between sessions and maximum file I/O performance – bind mount throughput within a single Linux kernel reaches 97–99% of native speed.

The key configuration file is .devcontainer/devcontainer.json, which describes the container launch parameters, VS Code extension installation, and a post-creation verification command. In particular, the parameters --cap-add=SYS_PTRACE and --security-opt seccomp=unconfined are required for the

GDB debugger to function correctly inside the container, since GDB uses the ptrace system call, which is blocked by Docker's default security profile. These parameters relax security in a controlled manner: they affect only the dedicated learning container and do not influence the host system or other containers. The complete VS Code configuration for both environment variants – native and Docker – with detailed setup instructions is available in the open repository [16].

6. Platform-specific deployment considerations

An important advantage of the Docker approach is its platform independence, which directly solves the problem of heterogeneous operating systems in student groups. Nevertheless, each platform requires specific attention to filesystem layout and runtime selection.

On ***Linux***, Docker Engine is installed natively via the package manager without any additional tools, providing maximum performance and the simplest possible setup. There is no virtualisation layer between the container and the host kernel, so I/O latency is minimal and process startup is virtually instantaneous.

For ***Windows 10/11***, the recommended option is to install Docker Engine inside the WSL2 subsystem (Windows Subsystem for Linux 2) without Docker Desktop, which provides native Linux kernel performance and full support for all memory analysis tools, including Valgrind. Project files should be stored in the WSL2 Linux filesystem (~/C_Projects/), not on the Windows drive (/mnt/c/) – this delivers 97–99% of native speed versus ~40% when working with the Windows filesystem due to the file-by-file translation through the 9P protocol. Educating students about this filesystem distinction is itself a useful pedagogical side-effect of the proposed methodology.

On ***macOS***, Docker Engine cannot run without a Linux kernel as a substrate. The recommended free alternative is OrbStack [17], a fully compatible replacement for Docker Desktop that requires no commercial license for personal use and automatically suspends the VM when Docker is idle, minimising battery

impact on portable devices. OrbStack uses native Apple Virtualization Framework, which provides near-native I/O performance for the bind-mounted source tree.

In all three cases the student uses the same unmodified Dockerfile, which serves as the single entry point for student groups with a mixed operating system fleet. The instructor is freed from the obligation to maintain three parallel sets of platform-specific instructions and can concentrate on the substantive content of the course.

7. Comparative analysis of native and Docker approaches

A comparison of two approaches for a Linux system – native tool installation and Docker containerisation – was performed. Criteria relevant to the educational process were evaluated (Table 1).

Table 1 – Comparative characteristics of the native and Docker approaches

Criterion	Native	Docker
Environment reproducibility	Low	High
Initial setup time	10–15 min	20–30 min
Dependency on distribution	High	None
Compilation speed	100%	97–99%
Project isolation	No	Yes
Environment versioning	Not possible	Dockerfile in git
Assignment verification complexity	High	Low
GDB support	Full	Requires --cap-add
Fixed libasan version	OS-dependent	Guaranteed

Analysis of the table shows that the only criterion by which the Docker approach is inferior to the native one is initial setup time. However, this difference is offset over the course of the semester: a one-time investment of 10–15 additional minutes at the outset is compensated by the elimination of

environmental problems at every subsequent session. The performance of both approaches is practically identical when project files are correctly located in the Linux filesystem.

Particularly important for the educational process is the assignment verification complexity criterion. With the native approach, the output format of Valgrind and ASan may differ between versions, making automated verification impossible and complicating peer review among students. With the Docker approach, the output is identical for both student and instructor, opening the possibility of automated assessment of assignments using a shared container image. In conjunction with continuous integration pipelines on platforms such as GitHub Actions or GitLab CI, this enables a fully reproducible grading workflow consistent with the principles of reproducible research articulated in [7] and [8].

8. Approbation in a real student group

The proposed approach was trialled in the Programming course for IT students at Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University. The student group consisted of 24 students using various operating systems: Ubuntu 20.04/22.04/24.04, Debian 11/12, Windows 11 (via WSL2), and macOS. The composition of the group, in terms of the host operating system, was approximately representative of the broader student population at the faculty.

Under the native approach (previous semester), the number of instructor consultations regarding environment problems during the first month of the course was 31. Only 47% of students were able to independently set up the full toolchain at the first session. Typical issues included: incompatibility of libasan versions across distributions, incorrect GDB configuration on macOS, the absence of Valgrind support on Windows without WSL, and conflicts between system and user package managers (in particular, the use of pip/Homebrew to install tools that conflicted with system-provided versions).

Under the Docker approach (current semester), the number of environment-related consultations dropped to 6 – a fivefold reduction. The share of students who independently configured the complete environment at the first session rose from 47% to 72%. The nature of the questions also changed qualitatively: students moved from technical environment issues to substantive questions about interpreting Valgrind and ASan output, which is direct evidence of improved learning effectiveness. Anonymous end-of-semester student feedback confirmed that the unified environment was perceived as a positive feature of the course, and several students reported subsequently reusing the same Dockerfile as a starting template in other courses and personal projects.

The results are consistent with the theoretical argument of Boehm [6] regarding the nonlinear growth of defect-correction costs depending on the stage of detection: resolving environmental problems at the start of the course is far less costly than their accumulation across the semester.

9. Pedagogical implications and limitations

Beyond the immediate quantitative outcomes, the proposed methodology has several pedagogical implications worth highlighting. First, by making the environment itself a versioned, inspectable artefact, the course implicitly trains students in the habit of treating infrastructure as code – a transferable skill explicitly listed in CC2020 [13] among the competencies expected of graduates of computing programmes. Second, the consistency of tool output between the student's machine, the instructor's machine and any automated grader removes a class of conflicts that would otherwise consume teacher-student communication bandwidth; the freed bandwidth can be redirected to substantive feedback on memory analysis. Third, the use of Docker creates a low-friction path for students to take their environment into subsequent courses, internships and graduate work, providing a long-term return on the up-front configuration effort.

The principal limitations of the approach are also worth recording. The Docker environment introduces a small but non-zero abstraction barrier between the student and the host operating system; students who require deep familiarity with a specific Linux distribution's packaging system will eventually need supplementary native exercises. On older or low-end hardware (notably Windows machines with fewer than 8 GB of RAM and HDD storage), the WSL2 VM may impose a noticeable boot-time and memory-pressure overhead, which can be partially mitigated by limiting WSL2 resources via the .wslconfig file. Finally, the methodology requires that the host has reliable Internet access for the initial image pull; in environments where this assumption fails, the instructor should distribute a pre-built image as an offline tar archive.

Conclusions

The application of Docker containerisation for organising the learning environment in a course on C memory error detection has proved to be a substantiated and practically effective approach. The pedagogical characterisation of memory management error classes and their detection tools – Valgrind/Memcheck and AddressSanitizer as dynamic analysers, Cppcheck for static analysis, and GDB for interactive debugging – provided a coherent foundation for designing the environment around the actual diagnostic workflow. A three-tier architecture was proposed in which the host operating system, a Docker image based on debian:bookworm-slim, and Visual Studio Code connected through the Dev Containers specification jointly deliver an identical toolchain on Linux, Windows and macOS through a single Dockerfile.

A comparative analysis across nine educational criteria confirmed the advantages of containerisation in reproducibility, project isolation, environment versioning and automated assignment verification; the only concession – a slightly longer initial setup – is fully amortised within a semester. Approbation in a IT student group confirmed a fivefold reduction in environment-related consultations

and a rise in independent first-session setup from 47% to 72%, accompanied by a qualitative shift of student questions towards the substantive interpretation of analyser output. The principal limitations – the abstraction barrier over the host OS, WSL2 resource overhead on low-end hardware, and the dependence on Internet access for the initial image pull – are explicitly formulated for future deployments.

Further research directions include automated assignment assessment based on the shared Docker image, evaluation of cloud environments such as GitHub Codespaces and GitPod as alternatives for resource-constrained students, and extension of the methodology to adjacent systems-programming courses.

References

1. Kernighan, B. W., & Ritchie, D. M. (1988). *The C programming language* (2nd ed.). Prentice Hall.

2. Seacord, R. C. (2013). *Secure coding in C and C++* (2nd ed.). Addison-Wesley Professional.

3. Nethercote, N., & Seward, J. (2007). Valgrind: A framework for heavyweight dynamic binary instrumentation. In *Proceedings of the 28th ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation (PLDI '07)* (pp. 89–100). ACM. https://doi.org/10.1145/1250734.1250746

4. Serebryany, K., Bruening, D., Potapenko, A., & Vyukov, D. (2012). AddressSanitizer: A fast address sanity checker. In *Proceedings of the 2012 USENIX Annual Technical Conference (ATC '12)* (pp. 309–318). USENIX Association. https://www.usenix.org/conference/atc12/technical-sessions/presentation/serebryany

5. ISO/IEC 25010:2023. (2023). *Systems and software engineering – Systems and software quality requirements and evaluation (SQuaRE) – Product quality model*. ISO. https://www.iso.org/standard/78176.html

6. Boehm, B. W. (1981). *Software engineering economics.* Prentice-Hall.

7. Wilson, G., Aruliah, D. A., Brown, C. T., Chue Hong, N. P., Davis, M., Guy, R. T., Haddock, S. H. D., Huff, K. D., Mitchell, I. M., Plumbley, M. D., Waugh, B., White, E. P., & Wilson, P. (2014). Best practices for scientific computing. *PLOS Biology*, *12*(1), Article e1001745. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001745

8. Boettiger, C. (2015). An introduction to Docker for reproducible research, with examples from the R environment. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, *49*(1), 71–79. https://doi.org/10.1145/2723872.2723882

9. Cito, J., & Gall, H. C. (2016). Using Docker containers to improve reproducibility in software engineering research. In *Proceedings of the 38th International Conference on Software Engineering Companion (ICSE '16)* (pp. 906–907). ACM. https://doi.org/10.1145/2889160.2891057

10. Merkel, D. (2014). Docker: Lightweight Linux containers for consistent development and deployment. *Linux Journal*, *2014*(239), Article 2. https://doi.org/10.5555/2600239.2600241

11. Open Container Initiative. (2023). *OCI image format specification, v1.1.0*. https://github.com/opencontainers/image-spec

12. Microsoft Corporation. (2023). *Development containers specification*. https://containers.dev/

13. CC2020 Task Force. (2020). *Computing curricula 2020: Paradigms for global computing education*. Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/3467967

14. MISRA. (2012). *MISRA C: 2012 – Guidelines for the use of the C language in critical systems*. Motor Industry Software Reliability Association.

15. IEEE. (2021). *IEEE standard for DevOps: Building reliable and secure systems including application build, package, and deployment* (IEEE Std 2675-2021). IEEE. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2021.9415476

16. Danyliuk, I. (2026). *VS Code configuration for C development on Linux: Native and Docker approaches* [Online resource]. https://github.com/uixcoder/c_utils /blob/main/memory_leaks/linux/vscode_config_linux_c_dev.md

17. Danyliuk, I. (2026). *C development environment setup via Docker* [Online resource]. https://github.com/uixcoder/c_utils/blob/main/memory_leaks/crossplatform/ vscode_config_docker_crossplatform.md

Horban Hlib, Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Software Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6512-3576

Antipova Kateryna, PhD, Associate Professor (acting) of the Department of Software Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9012-5290

Falenkova Maryna, Senior Lecturer of the Department of Software Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7797-0142

ARCHITECTURE OF A WEB-BASED SYSTEM FOR ANALYSING THE TONE AND THEMATIC STRUCTURE OF TEXT DATA

Abstract

The article discusses approaches to building a web-based text data analysis system that combines message sentiment classification and thematic modeling within a single software solution. The aim of the study is to develop the architecture and software implementation of a system capable of automating the full text processing cycle: receiving input data, preprocessing, determining emotional tone, identifying key topics, saving results, and presenting them to the user via a web interface.

The methodological foundation consists of natural language processing methods, text vectorization using TF-IDF, sentiment classification using a Support Vector Classifier, and topic modeling based on Latent Dirichlet Allocation.

A modular approach to design was used: the client-side, server API, machine learning module, authentication mechanisms, and data storage were separated. As a result of the research, a system architecture was proposed that ensures the integrated execution of two analytical tasks—determining the text's

sentiment and identifying thematic patterns in the message corpus. The paper describes the main system entities, the mechanism for forming an analysis request, the method of presenting results in JSON format, and the approach to service deployment, in which the base API is implemented in C#, and the analytical processing module is implemented as a separate service on FastAPI.

The scientific novelty of this work lies in the combination of classical machine learning models for text analysis with a distributed service architecture of a web application, which allows separating the computationally intensive natural language processing module from the system's application logic and simplifies scaling, maintenance, and further expansion of functionality.

The practical significance of the results lies in the ability to use the proposed solution for monitoring public sentiment, analyzing user feedback, conducting market research, preprocessing text corpora, and generating analytical reports. The developed system can serve as a foundation for further improvement through the expansion of language support, the adaptation of models to domain-specific corpora, the enhancement of result interpretability, and the implementation of more advanced visualization tools.

Keywords: sentiment analysis, thematic modeling, natural language processing, machine learning, text classification, web system.

Introduction. In today's world, information flows are increasing at a breakneck pace, requiring new approaches to data analysis. One of the promising areas is text sentiment analysis, which provides valuable insights into users' thoughts, emotions, and reactions. Such analysis is useful for various fields, including marketing, sociology, political science, and other areas where it is important to understand public sentiment and reactions to specific events.

Thanks to modern machine learning and natural language processing technologies, it has become possible to automate the process of analyzing texts

based on their content and tone. This not only significantly speeds up the information processing process but also improves the accuracy of the results obtained, which is crucial in the context of analyzing large volumes of data. Topic modeling tools can identify hidden themes and key elements in texts, creating new opportunities for sentiment analysis in a dynamic information space.

Analysis of recent research and publications. Topic modeling is a text analysis method that allows for the detection and identification of topics present in a text dataset [1]. The main idea is that each document can be represented as a combination of different topics with specific probabilities. This text analysis method, combined with sentiment analysis, will allow us to analyze and identify community dynamics.

The main methods of topic modeling include Latent Dirichlet Allocation (LDA), Non-Negative Matrix Factorization (NMF), and modern neural approaches such as BERT Topic Modeling. Each of these methods has its own characteristics and applications.

Latent Dirichlet Allocation (LDA) is a generative model that assumes that each document is a mixture of topics, and each topic is a mixture of words [2]. The main idea behind LDA is to find the topics that best describe the structure of the text data. The model uses a hierarchical approach to identify topics based on word frequencies in documents, allowing it to automatically detect the probability distributions of topics in each document. One of the main advantages of LDA is its ability to process large volumes of text data and identify topics without the need to predefine the number of topics. However, LDA also has its limitations, notably the need to tune hyperparameters, which can significantly affect the results, as well as difficulties in interpreting topics if their number does not correspond to the actual data structure.

Another popular method is Non-Negative Matrix Factorization (NMF), which is also used for topic modeling [3]. NMF treats text data as a term-

document matrix and decomposes this matrix into two non-negative matrices—one for terms-topics and the other for topics-documents. Thus, NMF helps identify latent topics that explain the observed terms in the documents. One of the main advantages of NMF is its ability to identify interpretable topics due to the non-negativity constraint, which provides more understandable and consistent results. However, NMF can be sensitive to initial conditions and requires the prior specification of the number of topics, which can complicate model tuning.

Latent Semantic Analysis (LSA) is another method based on matrix decomposition [4]. LSA uses singular value decomposition of the term-document matrix to reduce dimensionality and extract latent semantic structures in text data. This allows the model to identify synonymic and semantic relationships between words, which helps to better understand the context of topics. The advantage of LSA lies in its ability to reduce noise in the data and identify hidden topics. However, LSA can sometimes generate topics that are difficult to interpret and has limitations in representing contextual relationships based on static matrices.

Modern models, such as BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers), offer new approaches to topic modeling. BERT uses transformers for deep contextual understanding of text and can be adapted for topic analysis through specific configurations or fine-tuning for topic modeling tasks [5, 6, 7]. The advantage of BERT lies in its ability to account for the context of words on both sides and provide accurate results for complex tasks, but this method requires significant computational resources and a large volume of data for training.

Thus, sentiment analysis and topic modeling methods in machine learning provide various ways to identify and organize topics in text data. The choice of a specific method depends on the specifics of the task, the volume of data, and the desired accuracy of the results.

Problem Statement. The problem addressed in this study is the development of a software system capable of automating the entire cycle of text data analysis: from text ingestion and format validation to the classification of message polarity, thematic structuring, storage of results, and their subsequent presentation to the user. Unlike a standalone ML script, such a system must take into account requirements for access security, user-friendly interface, scalability, maintainability, and integration with external services. Based on this, it was necessary not only to select appropriate algorithms but also to develop a comprehensive architecture for the information system.

Main part. The architectural concept of the system under development is based on a modular division of responsibilities among the client-side, server API, machine learning service, data store, message broker, and authentication server. Several complementary models were used to describe the system's structure: the ERD provides an overview of the database entities and relationships, the DFD depicts information flows and the logic of request processing, and the deployment diagram shows the physical placement of components and the communication channels between them.

The ERD illustrates the relationships between the system's main entities: "User," "Analysis Request," "Sentiment Analysis," "Thematic Modeling," and "Analysis Report" (Fig. 1).

The "User" entity represents a system user who has a unique identifier (uuid), a username, and an account creation date. This is the primary entity to which all text analysis operations are linked.

The "AnalysisRequest" entity is responsible for user requests to analyze text data. Each request has a unique identifier, belongs to a specific user, contains a text corpus for analysis in JSON format, and may be linked to a previous request if it is a continuation or modification of a previously made request. The time when the request was made is also stored.

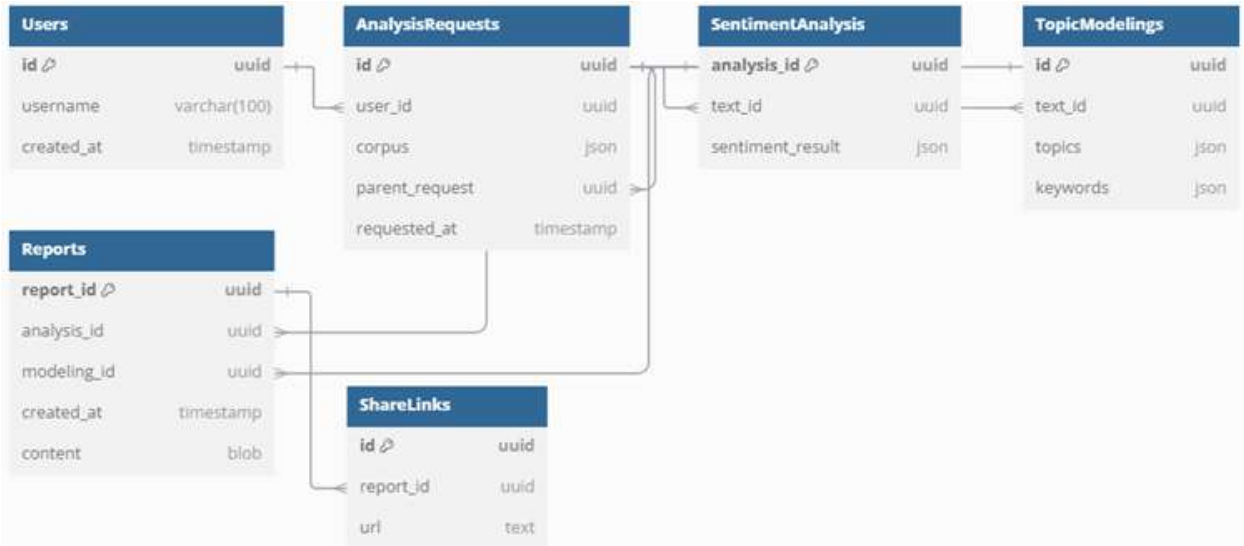


Figure 1 – ERD of a text sentiment analysis system based on thematic modeling

The “SentimentAnalysis” entity represents the results of sentiment analysis for a specific text included in the request. It contains a unique identifier, a link to the text request, and the result in JSON format, which stores data on the emotional tone of the text.

The “TopicModeling” entity stores the results of topic modeling performed on text data. It also has a unique identifier and a link to a specific analysis request. The modeling results store the topics and keywords found during the analysis, presented in JSON format.

The “Report” entity combines the results of sentiment analysis and topic modeling. It contains information about which user created the report, as well as links to the sentiment and topic analysis results. Additionally, the report stores the creation date and the report content in BLOB (binary large object) format, which can be exported.

The “ShareLink” entity allows the user to share generated reports with other users. The link is tied to a specific report and has a short URL for convenient access.

In the context of developing a text sentiment analysis system, the class diagram (Fig. 2) represents the classes responsible for text analysis, data processing, database operations, and report generation.

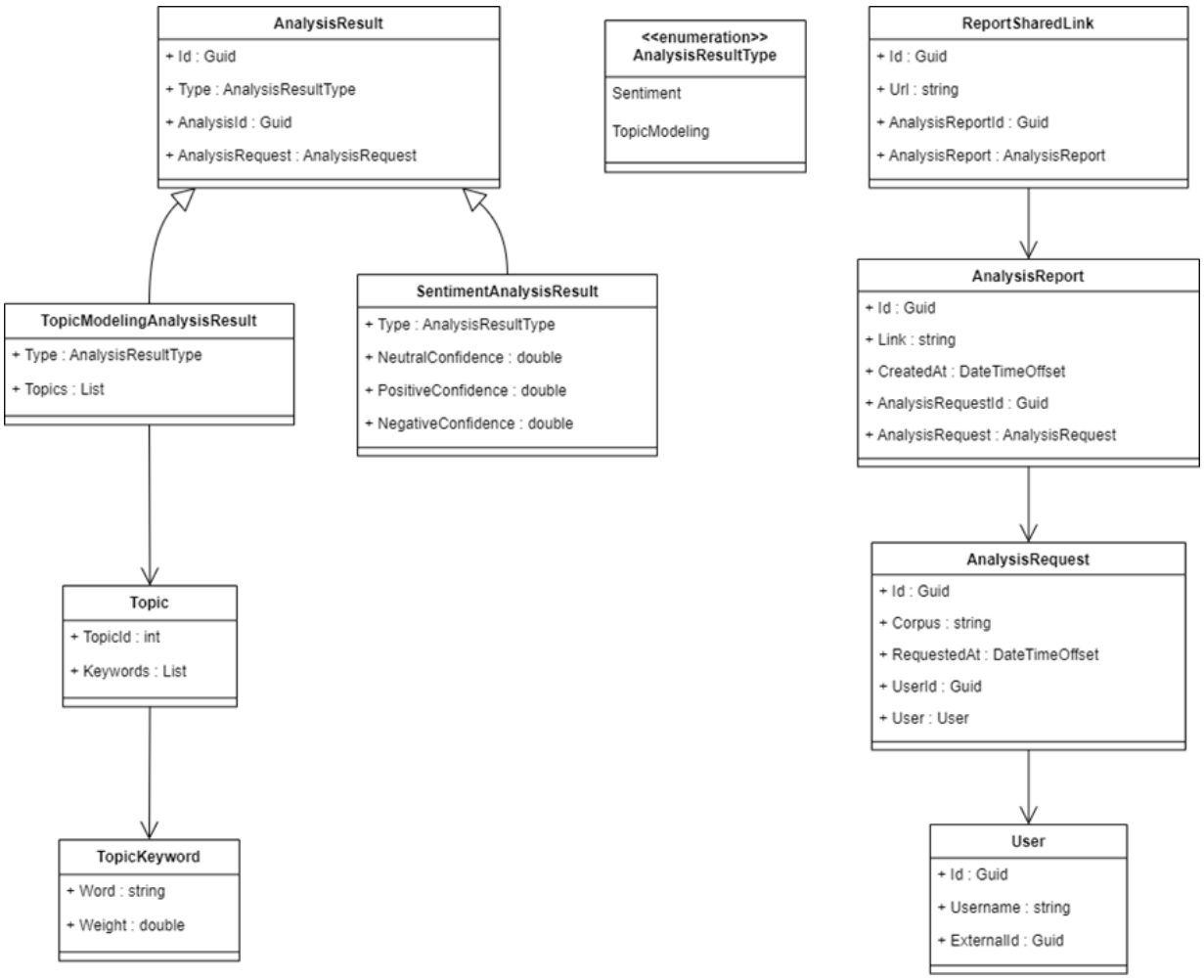


Figure 2 – System Class Diagram

The class diagram consists of the following classes:

– AnalysisReport: represents an analysis report, containing a link and information about the analysis request;

– AnalysisRequest: contains data about the text analysis request, including the text and the user who created it;

– AnalysisResult: represents the analysis result, which can be of the “sentiment analysis” or “thematic modeling” type;

– AnalysisResultType: a list of analysis types available in the system (sentiment analysis or topic modeling);

– ReportSharedLink: contains information about the link for sharing the report;

– SentimentAnalysisResult: the result of sentiment analysis with confidence scores for neutral, positive, and negative sentiments;

– TopicModelingAnalysisResult: the result of topic modeling, containing a list of topics;

– Topic: represents a single topic consisting of keywords;

– TopicKeyword: represents a keyword and its weight for a specific topic;

– User: represents the user who initiated the analysis request.

The system consists of several key components (Fig. 3) that perform their specialized functions. One of them is TextAnalyzer.Core, which acts as a central module with base models and interfaces. It provides fundamental classes and types used in all other system modules. Thanks to this, TextAnalyzer.Core serves as a foundation for expanding functionality and implementing new features.

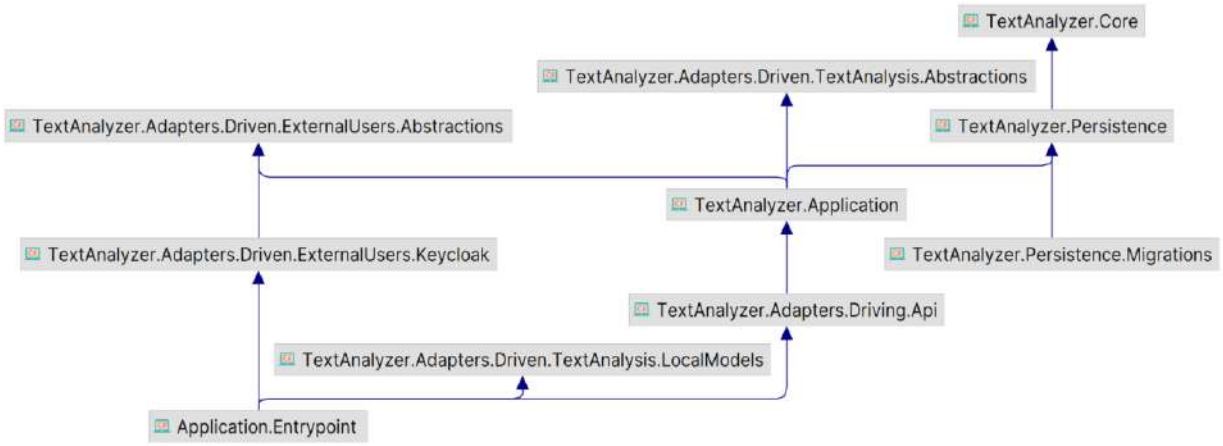


Figure 3 – Project Diagram

Another important module is TextAnalyzer.Application, which implements the system's business logic. It coordinates interaction between various

components, ensuring the execution of the system's core functions, such as text analysis, processing user requests, and data management. This module uses TextAnalyzer.Core resources to work with base models and provides connectivity to external APIs and adapters.

The TextAnalyzer.Adapters.Driving.Api module is used for the system's interaction with external clients. It is responsible for providing an API through which external applications and services can access text analysis functionality. This module receives data from TextAnalyzer.Application and provides it in a convenient format for external users, ensuring integration with other systems.

The Support Vector Classification (SVC) method was chosen for sentiment analysis due to its high accuracy when working with various datasets and its ability to effectively classify text data. SVC is well-suited for tasks with a small number of classes, as this algorithm creates optimal hyperplanes that separate classes, allowing for better results even with a small amount of training data [8, 9]. Another important advantage of SVC is its robustness to noise in the data.

In the support vector method, the main idea is to find a hyperplane that separates two classes in such a way as to maximize the margin between them. For linearly separable data, a hyperplane is sought that has the equation where w is the weight vector, x is the feature vector, and b is the bias:

$$w^T x + b = 0. \quad (1)$$

The algorithm searches for a hyperplane that maximizes the gap between the points of both classes. This is achieved by minimizing the weight vector w, which is equivalent to maximizing the margin between the classes. The boundary conditions for each point x_i in class y_i (where $y_i = \pm 1$) are defined as:

$$y_i(w^T x_i + b) \geq 1. \quad (2)$$

This means that all points of one class must lie on one side of the hyperplane, and points of the other class on the opposite side, with the nearest

points being at least 1 unit away from the hyperplane. The objective is to minimize the function:

$$\frac{1}{2}\left|\left|w\right|\right|^2. \quad (3)$$

However, if the data is not linearly separable, additional error variables ξ_i are introduced to allow certain points to be misclassified. Then the conditions are modified to:

$$y_i(w^T x_i + b) \geq 1 - \xi_i. \quad (4)$$

And the new function to be minimized:

$$\frac{1}{2}\left|\left|w\right|\right|^2 + C\sum_i \ \xi_i, \quad (5)$$

where C is a hyperparameter that controls the trade-off between maximizing the margin and the number of misclassified points.

When training the machine learning model, the SVC implementation from the sklearn library was used, along with auxiliary libraries such as pandas and nltk [10, 11, 12].

The dataset was loaded from a CSV file, and for simplicity, only two columns were selected from it: text and labels. The labels were converted from numerical to text labels, and then they were encoded into a numerical format using LabelEncoder, which is required for training the model.

To obtain more accurate results, it is important to preprocess the data; for this, English stop words are loaded from the nltk library, and SnowballStemmer is used for stemming [12]. A function was also created for preprocessing text strings:

The data was split into training and test sets using `train_test_split`, which helps avoid overfitting the model, ensures stable results during testing, and allows for validation on a separate dataset. A Pipeline was used to build the model, combining two stages: text vectorization using TfidfVectorizer and training the SVC model with a linear kernel [13, 14]. After training the model, predictions are

made for the test set, and then accuracy is calculated based on the predicted and actual values.

```
    X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
        pd.concat([df['text'][:10000],   df['text'][-10000:]]),
pd.concat([df['label'][:10000],          df['label'][-10000:]]),
test_size=0.2, random_state=21910825
    )
    pipeline = Pipeline([
        ('vectorizer',       TfidfVectorizer(max_features=5000,
ngram_range=(1, 2))),
        ('svm', SVC(kernel='linear', probability=True))
    ])

    pipeline.fit(X_train, y_train)
    y_pred = pipeline.predict(X_test)
    accuracy = accuracy_score(y_test, y_pred)
    print(f'Model Accuracy: {accuracy * 100:.2f}%')
```

The Latent Dirichlet Allocation (LDA) method was chosen for topic modeling due to its ability to automatically identify hidden topics in texts, making it ideal for working with text corpora of various sizes [2]. LDA uses a probabilistic model that identifies a set of topics that best describe the text corpus, allowing for the identification of important topics and their keywords. Thanks to this model, the system can perform in-depth analysis of text data, which is useful for studying structured patterns in large data sets.

The main idea behind LDA is that documents can be represented as mixtures of latent topics, and each topic is represented by a set of words with specific probabilities. LDA searches for these latent topics, which can be used to understand the structure of the text.

Mathematically, for each document *d* and topic *k*, LDA models the probability that a given word belongs to that topic. In this context, a document is represented as a mixture of topics, and each topic is a mixture of words.

The process includes the following steps:

– for each document d, a topic distributionθ_d is selected, which is a Dirichlet parameter;

– for each word in the document, a topic z is selected based on the topic distributionθ_d ;

– a word is selected for topic z based on another Dirichlet distributionϕ_k , which models the probability of words for each topic.

The key formula in LDA is the calculation of a word's probability in a document as the sum across all possible topics:

$$P(W_i|d) = \sum_{k=1}^{K} P(w_i|z_k)P(z_k|d). \quad (6)$$

In the implementation of LDA model training, the main steps include loading data, preprocessing it, vectorizing it, and building the LDA model for topic detection. First, the necessary libraries are imported, including nltk for text processing and sklearn, which provides the LDA model implementation. As with sentiment analysis, the data is read from a CSV file, and for simplicity, only the text column is used.

```
nltk.download('stopwords')

stemmer = PorterStemmer()
stop_words = set(stopwords.words('english'))
def preprocess_text(text):
    text = text.lower()
    text = re.sub(r'[^a-z\s]', '', text)
    tokens = text.split()
    tokens = [stemmer.stem(token) for token in tokens if
token not in stop_words]
    return ' '.join(tokens)
df = pd.read_csv('./data/data.csv', names=['label', 'id',
'date', 'flag', 'user', 'text'])
df = df[['text']]
df['text'] = df['text'].apply(preprocess_text)
```

Once the data is processed, it is split into training and test sets using `train_test_split`, and a Pipeline is created that combines text vectorization using `TfidfVectorizer` with LDA model training via `LatentDirichletAllocation` [13, 14, 15]. Setting the `n_components` parameter to 3 means that the model attempts to identify three main topics in the text.

```
train, test = train_test_split(
    pd.concat([df['text'][:10000], df['text'][-10000:]]),
test_size=0.2, random_state=21910825
)
pipeline = Pipeline([
    ('vectorizer', TfidfVectorizer(max_features=5000,
ngram_range=(1, 2))),
    ('lda', LatentDirichletAllocation(n_components=3,
random_state=21910825))
])
pipeline.fit(train)
feature_names =
pipeline.named_steps['vectorizer'].get_feature_names_out()
model = pipeline.named_steps['lda']
for topic_idx, topic in enumerate(model.components_):
        top_features_ind = topic.argsort()[:-10 - 1:-1]
        top_features = [feature_names[i] for i in
top_features_ind]
        print(f"Topic {topic_idx}: {top_features}")
```

After training the model, keywords are output for each topic, allowing us to understand the main content of the topics identified by LDA. Using `model.components_`, we can obtain the indices of the most significant words for each topic, which aids in further text analysis. Thus, the training and analysis of the topics provided in the text data are complete, which is an important step in the development of a text analysis system.

The system's core API is implemented in C#, ensuring integration with all necessary functional modules. However, a separate application based on FastAPI has been developed to utilize machine learning models [16; 17]. This approach

allows for more efficient management of specific tasks related to data processing and running machine learning models. The separation of the analytical module into an independent service also corresponds to the principles of microservice-oriented architecture, where individual services communicate through lightweight interfaces and can be maintained or scaled separately [18].

Conclusions. As a result of this study, a conceptual and software framework for a text sentiment analysis system based on thematic modeling has been developed, combining machine learning tools with a web-oriented application architecture. Unlike narrow experimental solutions, the proposed system is not limited to the isolated application of a classification model but covers the entire text processing workflow: data input, preprocessing, analytical processing, secure user interaction, storage of results, and their presentation in the interface. This allows the developed software tool to be viewed as a comprehensive platform for working with text corpora in tasks such as public sentiment monitoring, marketing analysis, and research observations.

Prospective areas for further research include expanding language support, adapting models to domain-specific corpora, improving the quality of thematic modeling, expanding reporting and visualization capabilities, and conducting more detailed experimental evaluation of models on test datasets. Separately, it is worth developing a multi-class sentiment classification scheme, integrating additional mechanisms for explaining results, and exploring hybrid approaches in which classical models are supplemented with modern contextual representations. This direction of development will allow us to maintain the system’s engineering manageability while simultaneously increasing the analytical depth of text data processing.

References

1) Hankar M., Kasri M., Beni-Hssane A. (2025). A comprehensive overview of topic modeling: Techniques, applications and challenges. Neurocomputing. Vol. 628. Article 129638. DOI: 10.1016/j.neucom.2025.129638.

2) Blei D. M., Ng A. Y., Jordan M. I. Latent Dirichlet Allocation. (2003). Journal of Machine Learning Research. Vol. 3. P. 993-1022.

3) Lee D. D., Seung H. S. (1999). Learning the parts of objects by non-negative matrix factorization. Nature. Vol. 401. P. 788-791. DOI: 10.1038/44565.

4) Deerwester S., Dumais S. T., Furnas G. W., Landauer T. K., Harshman R. (1990). Indexing by latent semantic analysis. Journal of the American Society for Information Science. Vol. 41, No. 6. P. 391-407. DOI: 10.1002/(SICI)1097-4571(199009)41:6<391::AID-ASI1>3.0.CO;2-9.

5) Hayat F., Shatnawi S., Haig E. (2024). Comparative Analysis of Topic Modelling Approaches on Student Feedback. Proceedings of the 16th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management - Volume 1: KDIR. P. 226-233. DOI: 10.5220/0012890400003838.

6) Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. (2019). BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. Proceedings of NAACL-HLT 2019. Minneapolis. P. 4171-4186. DOI: 10.18653/v1/N19-1423.

7) Grootendorst M. (2022). BERTopic: Neural topic modeling with a class-based TF-IDF procedure. arXiv preprint arXiv:2203.05794. DOI: 10.48550/arXiv.2203.05794.

8) Cortes C., Vapnik V. (1995). Support-vector networks. Machine Learning. Vol. 20. P. 273-297. DOI: 10.1007/BF00994018.

9) Diri G., Obiorah P., Du H. (2025). Comparative Study of Sentiment Analysis Techniques: Traditional Machine Learning vs. Deep Learning Approaches. InSITE 2025. P. 23. DOI: 10.28945/5490.

10) Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A. et al. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. Journal of Machine Learning Research. Vol. 12. P. 2825-2830.

11) Scikit-learn developers. sklearn.svm.SVC. Scikit-learn documentation. URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.svm.SVC.html (accessed: 21.04.2026).

12) Bird S., Klein E., Loper E. (2009). Natural Language Processing with Python. O'Reilly Media. 504 p.

13) Scikit-learn developers. sklearn.feature_extraction.text.TfidfVectorizer. Scikit-learn documentation. URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.feature_extraction.text.TfidfVectorizer.html (accessed: 07.05.2026).

14) Scikit-learn developers. sklearn.pipeline.Pipeline. Scikit-learn documentation. URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.pipeline.Pipeline.html (accessed: 21.04.2026).

15) Scikit-learn developers. sklearn.decomposition.LatentDirichletAllocation. Scikit-learn documentation. URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.decomposition.LatentDirichletAllocation.html (accessed: 21.04.2026).

16) Microsoft. Create web APIs with ASP.NET Core. Microsoft Learn documentation. URL: https://learn.microsoft.com/en-us/aspnet/core/web-api/?view=aspnetcore-10.0 (accessed: 22.04.2026).

17) FastAPI. FastAPI documentation. URL: https://fastapi.tiangolo.com/ (accessed: 22.04.2026).

18) Lewis J., Fowler M. (2014). Microservices: a definition of this new architectural term. URL: https://martinfowler.com/articles/microservices.html (accessed: 22.04.2026).

Колотило Юлія Олександрівна, студентка 5 курсу, спеціальність 222 “Медицина”, Буковинський державний медичний університет, м. Чернівці, Україна

Печеряга Світлана Володимирівна, кандидатка медичних наук, асистентка кафедри акушерства, гінекології та перинатології**,** Буковинський державний медичний університет**,** м. Чернівці, Україна, https://orcid.org/0000-0003-3884-9109

Kolotylo Yuliia, 5th year student, specialty 222 “Medicine”, Bukovinian State Medical University, Chernivtsi, Ukraine

Pecheriaha Svitlana, Candidate of Medical Sciences, assistant Department of Obstetrics, Gynecology and Perinatology, Bukovinian State Medical University, Chernivtsi, Ukraine, https://orcid.org/0000-0003-3884-9109

ПЕРЕДЧАСНІ ПОЛОГИ: ФАКТОРИ РИЗИКУ ТА ПРОФІЛАКТИКИ

PRETERM BIRTH: RISK FACTORS AND PREVENTION

Анотація

Передчасні пологи залишаються однією з найактуальніших проблем сучасного акушерства та перинатології, оскільки є провідною причиною неонатальної захворюваності та смертності у світі. За даними Всесвітньої організації охорони здоров’я, щороку передчасно народжується близько 13–15 мільйонів дітей, що становить приблизно кожне десяте народження. Найвищі показники реєструються у країнах із низьким та середнім рівнем доходу, однак тенденція до зростання частоти передчасних пологів спостерігається і в економічно розвинених державах. Передчасними

вважаються пологи, що відбуваються у терміні до 37 повних тижнів гестації, а найбільший ризик тяжких ускладнень характерний для дітей, народжених до 32 тижнів вагітності. Основними наслідками недоношеності є респіраторний дистрес-синдром, внутрішньошлуночкові крововиливи, некротизуючий ентероколіт, інфекційні ускладнення, порушення нервово-психічного розвитку та підвищений ризик інвалідизації у подальшому житті. Етіологія передчасних пологів є мультифакторною та включає інфекційно-запальні процеси, істміко-цервікальну недостатність, багатоплідну вагітність, ендокринні порушення, хронічні соматичні захворювання, стресові фактори та ускладнення вагітності. Значну роль відіграють також соціально-економічні чинники, низька якість пренатального спостереження та шкідливі звички. Сучасні стратегії профілактики базуються на ранньому виявленні груп ризику, застосуванні прогестерону, серкляжу шийки матки, контролі інфекційних ускладнень та оптимізації антенатального ведення вагітності.

Ключові слова: передчасні пологи, недоношеність, вагітність, прогестерон, шийка матки, акушерські ускладнення, профілактика, перинатальна смертність, цервікальний серкляж, неонатальні наслідки.

Abstract

Preterm birth remains one of the most significant problems of modern obstetrics and perinatology, as it is a leading cause of neonatal morbidity and mortality worldwide. According to the World Health Organization, approximately 13–15 million children are born prematurely each year, accounting for nearly one in ten births globally. The highest rates are observed in low- and middle-income countries; however, an increasing incidence of preterm birth is also reported in economically developed nations. Preterm birth is defined as delivery occurring before 37 completed weeks of gestation, with the greatest risk of severe

complications observed in infants born before 32 weeks of pregnancy. The major consequences of prematurity include respiratory distress syndrome, intraventricular hemorrhage, necrotizing enterocolitis, infectious complications, neurodevelopmental disorders, and an increased risk of long-term disability. The etiology of preterm birth is multifactorial and includes infectious and inflammatory processes, cervical insufficiency, multiple pregnancy, endocrine disorders, chronic somatic diseases, stress-related factors, and pregnancy complications. Socioeconomic determinants, inadequate prenatal care, and harmful habits also play a substantial role. Modern prevention strategies are based on early identification of high-risk groups, the use of progesterone therapy, cervical cerclage, management of infectious complications, and optimization of antenatal care.

Keywords: preterm birth, prematurity, pregnancy, progesterone, cervix, obstetric complications, prevention, perinatal mortality, cervical cerclage, neonatal outcomes.

Постановка проблеми. Передчасні пологи (ПП) залишаються однією з провідних причин перинатальної захворюваності та смертності у світі. За даними Всесвітньої організації охорони здоров’я, щороку приблизно 13–15 мільйонів дітей народжуються передчасно, тобто до 37-го тижня гестації, що становить близько 10% усіх пологів. Найвищі показники передчасного народження реєструються у країнах із низьким і середнім рівнем доходу, однак проблема залишається актуальною і для розвинених країн через значні економічні витрати та високий ризик довготривалих неврологічних, респіраторних і метаболічних ускладнень у дітей [1].

Передчасні пологи асоціюються з високою частотою неонатального респіраторного дистрес-синдрому, внутрішньошлуночкових крововиливів, некротизуючого ентероколіту, бронхолегеневої дисплазії та дитячого

церебрального паралічу. Ризик смертності серед недоношених новонароджених у десятки разів перевищує аналогічний показник у доношених дітей, особливо при народженні до 32-го тижня вагітності або масі тіла менше 1500 г. У сучасному акушерстві передчасні пологи розглядаються не лише як акушерська проблема, а як мультифакторний синдром, розвиток якого пов'язаний із взаємодією інфекційних, імунологічних, ендокринних, генетичних та соціальних чинників [2].

Сучасні підходи до профілактики передчасних пологів базуються на ранньому виявленні жінок високого ризику, оцінці довжини шийки матки, використанні прогестеронової підтримки, профілактичному серкляжі та своєчасному лікуванні інфекційних процесів. Незважаючи на значний прогрес перинатальної медицини, частота передчасних пологів у багатьох країнах не демонструє суттєвого зниження, що обумовлює необхідність подальшого вивчення патогенетичних механізмів та вдосконалення профілактичних стратегій [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження підтверджують, що передчасні пологи є мультифакторним синдромом, а не єдиною нозологією. За даними WHO (2023) та систематичних аналізів, у 2020 році у світі народилося приблизно 13,4 мільйона передчасно народжених дітей (9,9 % усіх пологів) [1]. Проблема зберігає актуальність попри певне зниження глобального тягаря: частота ПП залишається стабільно високою в країнах з низьким і середнім рівнем доходу, а в розвинених країнах домінують економічні витрати та довготривалі наслідки.

Останні глобальні аналізи (Liang et al., 2024; Ohuma et al., 2023) показують, що хоча стандартизовані показники захворюваності та смертності від ПП мають тенденцію до зниження з 1990 року, після 2016 року в деяких регіонах спостерігається стабілізація або навіть зростання. Передчасні пологи залишаються провідною причиною неонатальної

смертності (близько 900 000 смертей щорічно) та довготривалих ускладнень — неврологічних (церебральний параліч, когнітивні порушення), респіраторних (бронхолегенева дисплазія) та метаболічних.

Значний прогрес досягнуто у розумінні патофізіологічних механізмів. Сучасні огляди (Ayele et al., 2025; Williams et al., 2025) підкреслюють роль інфекційно-запальних процесів (25–40 % випадків), зокрема субклінічного хоріоамніоніту, бактеріального вагінозу та дисбіозу вагінального мікробіому. Порушення мікробіому (зниження *Lactobacillus* spp., зростання анаеробів) активує прозапальні цитокіни (IL-1, IL-6, TNF-α), простагландини та металопротеїнази, що призводить до передчасного дозрівання шийки матки та активації міометрія.

Незважаючи на прогрес, частота ПП в багатьох країнах не знижується суттєво. Це зумовлює потребу в подальшому розвитку багатопрофільних стратегій, включаючи multi-omics підходи, покращення біомаркерів (фетальний фібронектин, PAMG-1) та персоналізовані алгоритми.

Мета статті — проаналізувати сучасні наукові дані щодо етіопатогенезу, факторів ризику та профілактики передчасних пологів, узагальнити ефективність ключових інтервенцій (прогестеронова підтримка, цервікальний серкляж, оцінка довжини шийки матки, біомаркери), а також окреслити перспективи персоналізованої медицини та нові дослідницькі напрямки для зниження частоти та наслідків недоношеності.

Виклад основного матеріалу. Одним із найважливіших факторів ризику передчасних пологів є інфекційно-запальні процеси урогенітального тракту. За сучасними даними, приблизно у 25–40% випадків передчасні пологи асоційовані з внутрішньоамніотичною інфекцією або субклінічним запаленням плодових оболонок. Бактеріальний вагіноз, інфекції, спричинені Ureaplasma urealyticum, Mycoplasma hominis та іншими умовно-патогенними мікроорганізмами, здатні активувати синтез прозапальних цитокінів,

простагландинів та металопротеїназ, що стимулюють скоротливу активність матки та передчасне дозрівання шийки матки. Встановлено, що у вагітних із бактеріальним вагінозом ризик передчасних пологів збільшується приблизно у 1,5–2 рази порівняно з жінками з нормальною мікрофлорою піхви [4].

Істотну роль у розвитку передчасних пологів відіграє істміко-цервікальна недостатність та структурні зміни шийки матки. У сучасній клінічній практиці одним із найбільш інформативних предикторів є трансвагінальна ультразвукова оцінка довжини шийки матки. Вважається, що її скорочення менш ніж до 25 мм у терміні 18–24 тижні вагітності асоціюється зі значним підвищенням ризику передчасного народження дитини. У жінок із довжиною шийки матки менше 15 мм ризик пологів до 34 тижнів може перевищувати 50%. Особливо важливим цей показник є для пацієнток із передчасними пологами в анамнезі, де ризик рецидиву сягає 30–40% [5].

Одним із найбільш ефективних методів профілактики передчасних пологів у жінок високого ризику є застосування прогестерону. Прогестерон підтримує функціональний спокій міометрія, знижує синтез прозапальних цитокінів та пригнічує продукцію простагландинів, які беруть участь у запуску пологової діяльності. У метааналізах продемонстровано, що вагінальний прогестерон у жінок із короткою шийкою матки дозволяє знизити ризик передчасних пологів до 34 тижнів приблизно на 30–40%. Крім того, відзначено зниження частоти респіраторного дистрес-синдрому та неонатальної смертності у новонароджених [6].

Цервікальний серкляж залишається важливим профілактичним методом у вагітних із вираженою істміко-цервікальною недостатністю. Найбільш ефективним він є у пацієнток із повторними втратами вагітності або передчасними пологами в анамнезі та короткою шийкою матки. Дослідження демонструють, що своєчасно накладений серкляж дозволяє

суттєво пролонгувати вагітність та зменшити ризик пологів до 32–34 тижнів. Водночас процедура асоціюється з певними ризиками, включаючи інфекційні ускладнення, передчасний розрив плодових оболонок та стимуляцію маткової активності, тому потребує чіткого відбору пацієнток [7].

Важливе місце серед факторів ризику займають багатоплідна вагітність та застосування допоміжних репродуктивних технологій. Частота передчасних пологів при двійні становить приблизно 50–60%, а при трійні перевищує 90%. Перерозтягнення матки, плацентарна дисфункція та підвищений рівень прозапальних медіаторів сприяють ранньому запуску пологової діяльності. Крім того, жінки після екстракорпорального запліднення мають вищий ризик акушерських ускладнень навіть при одноплідній вагітності, що частково пов’язують із вихідною репродуктивною патологією та особливостями імплантації ембріона [8].

Соціально-економічні чинники також суттєво впливають на ризик передчасних пологів. Низький рівень доходу, хронічний стрес, недостатнє харчування, тяжкі умови праці та обмежений доступ до медичної допомоги асоціюються зі збільшенням частоти недоношеності. Куріння під час вагітності підвищує ризик передчасних пологів приблизно у 1,3–2 рази [9], а вживання наркотичних речовин або алкоголю додатково погіршує плацентарний кровообіг та підвищує ризик внутрішньоутробної затримки росту плода [18]. Окрему увагу приділяють психоемоційному стресу, який через активацію гіпоталамо-гіпофізарно-наднирникової системи здатний стимулювати передчасну пологову діяльність [19].

Значну роль у патогенезі передчасних пологів відіграють плацентарні порушення та судинна патологія. Прееклампсія, хронічна артеріальна гіпертензія, цукровий діабет та тромбофілічні стани асоціюються з ендотеліальною дисфункцією та плацентарною ішемією, що нерідко

потребує дострокового розродження через загрозу для матері або плода. При тяжкій прееклампсії до 25–30% вагітностей завершуються передчасними пологами. У таких випадках передчасне розродження часто є ятрогенним, тобто медично обґрунтованим рішенням для збереження життя пацієнтки та плода [10].

Важливим напрямком сучасної профілактики є прогнозування ризику передчасних пологів за допомогою біомаркерів. Найбільш вивченими є фетальний фібронектин, плацентарний альфа-мікроглобулін-1 та інсуліноподібний фактор росту, визначення яких дозволяє оцінити ризик передчасного початку пологової діяльності. Негативний тест на фетальний фібронектин має високу прогностичну цінність щодо низької ймовірності пологів у найближчі 7–14 днів, що допомагає уникнути необґрунтованої госпіталізації та агресивного лікування [11, 20].

У випадку загрози передчасних пологів важливе значення має антенатальна профілактика респіраторного дистрес-синдрому плода шляхом призначення глюкокортикостероїдів. Використання бетаметазону або дексаметазону між 24-м та 34-м тижнями вагітності дозволяє прискорити дозрівання легеневої тканини плода та знизити частоту респіраторних ускладнень, внутрішньошлуночкових крововиливів і неонатальної смертності. За даними метааналізів, застосування антенатальних стероїдів знижує ризик неонатальної смерті приблизно на 30% [12].

Токолітична терапія використовується для короткочасного пригнічення скоротливої активності матки та пролонгації вагітності на 48–72 години, необхідні для реалізації ефекту кортикостероїдів або транспортування вагітної до перинатального центру. Найчастіше застосовують блокатори кальцієвих каналів, антагоністи окситоцинових рецепторів та нестероїдні протизапальні препарати. Проте ефективність

токолізу щодо значного подовження вагітності залишається обмеженою, а основною метою терапії є покращення неонатальних результатів [13].

Особливе місце в сучасному акушерстві займає профілактика передчасних пологів у жінок із передчасним розривом плодових оболонок. У таких випадках суттєво зростає ризик хоріоамніоніту, неонатального сепсису та тяжких респіраторних ускладнень. Антибактеріальна терапія дозволяє пролонгувати вагітність та зменшити частоту інфекційних ускладнень. Найбільш ефективними вважаються комбінації макролідів та бета-лактамних антибіотиків, які забезпечують покриття основних патогенів урогенітального тракту [14].

Сучасні дослідження активно вивчають роль генетичних, епігенетичних та імунологічних механізмів у розвитку передчасних пологів [15-16]. Встановлено, що поліморфізми генів прозапальних цитокінів, порушення мікробіому піхви [17] та зміни імунної толерантності між материнським організмом і плодом можуть суттєво впливати на ризик передчасного завершення вагітності. Це відкриває перспективи для персоналізованої профілактики та створення нових терапевтичних стратегій у майбутньому.

Висновок. Передчасні пологи є мультифакторною патологією, що суттєво впливає на перинатальну захворюваність і смертність. Найважливішими напрямками профілактики є раннє виявлення вагітних групи ризику, контроль інфекційних процесів, оцінка стану шийки матки та своєчасне застосування прогестерону, серкляжу й антенатальної кортикостероїдної терапії. Сучасні дослідження спрямовані на вдосконалення персоналізованих підходів до прогнозування та профілактики передчасних пологів.

Література

1. Ohuma, E. O., Moller, A. B., Bradley, E., Chakwera, S., Hussain-Alkhateeb, L., Lewin, A., Okwaraji, Y. B., Mahanani, W. R., …. Moran, A. C. (2023). National, regional, and global estimates of preterm birth in 2020, with trends from 2010: a systematic analysis. *Lancet (London, England)*, *402*(10409), 1261–1271. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(23)00878-4

2. Vogel, J. P., Chawanpaiboon, S., Moller, A. B., Watananirun, K., Bonet, M., & Lumbiganon, P. (2018). The global epidemiology of preterm birth. *Best practice & research. Clinical obstetrics & gynaecology*, *52*, 3–12. https://doi.org/10.1016/j.bpobgyn.2018.04.003

3. *WHO recommendations on: Antenatal corticosteroids for improving preterm birth outcomes*. (2022). World Health Organization.

4. Romero, R., Dey, S. K., & Fisher, S. J. (2014). Preterm labor: one syndrome, many causes. *Science (New York, N.Y.)*, *345*(6198), 760–765. https://doi.org/10.1126/science.1251816

5. Tang, I. D., Mallia, D., Yan, Q., Pe'er, I., Raja, A., Salleb-Aouissi, A., & Wapner, R. (2024). A Scoping Review of Preterm Birth Risk Factors. *American journal of perinatology*, *41*(S 01), e2804–e2817. https://doi.org/10.1055/s-0043-1775564

6. Conde-Agudelo, A., Romero, R., Rehal, A., Brizot, M. L., Serra, V., Da Fonseca, E., Cetingoz, E., Syngelaki, A., Perales, A., Hassan, S. S., & Nicolaides, K. H. (2023). Vaginal progesterone for preventing preterm birth and adverse perinatal outcomes in twin gestations: a systematic review and meta-analysis. *American journal of obstetrics and gynecology*, *229*(6), 599–616.e3. https://doi.org/10.1016/j.ajog.2023.05.010

7. Wood, A. M., Dotters-Katz, S. K., & Hughes, B. L. (2019). Cervical Cerclage versus Vaginal Progesterone for Management of Short Cervix in Low-

Risk Women. *American journal of perinatology*, *36*(2), 111–117. https://doi.org/10.1055/s-0038-1668547

8. Roman, A., Ramirez, A., & Fox, N. S. (2022). Prevention of preterm birth in twin pregnancies. *American journal of obstetrics & gynecology MFM*, *4*(2S), 100551. https://doi.org/10.1016/j.ajogmf.2021.100551

9. Stock, S. J., & Bauld, L. (2020). Maternal smoking and preterm birth: An unresolved health challenge. *PLoS medicine*, *17*(9), e1003386. https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1003386

10. Boyer, T. M., Barrett, R. B., Xiong, C., Bu, F., Bhansali, R. A., Wallace, A. S., Fang, M., Vaught, A. J., Selvin, E., Hays, A. G., Michos, E. D., Ndumele, C. E., & Minhas, A. S. (2026). Hypertensive Disorders of Pregnancy and Premature Cardiovascular Disease in a Diverse Cohort of Young US Women. *Circulation*, *153*(7), 480–492. https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.125.078057

11. Ramachandran, A., Clottey, K. D., Gordon, A., & Hyett, J. A. (2024). Prediction and prevention of preterm birth: Quality assessment and systematic review of clinical practice guidelines using the AGREE II framework. *International journal of gynaecology and obstetrics: the official organ of the International Federation of Gynaecology and Obstetrics*, *166*(3), 932–942. https://doi.org/10.1002/ijgo.15514

12. Roberts, D., Brown, J., Medley, N., & Dalziel, S. R. (2017). Antenatal corticosteroids for accelerating fetal lung maturation for women at risk of preterm birth. *The Cochrane database of systematic reviews*, *3*(3), CD004454. https://doi.org/10.1002/14651858.CD004454.pub3

13. Yamaji, N., Suzuki, H., Saito, K., Swa, T., Namba, F., Vogel, J. P., Ramson, J. A., Cao, J., Tina, L., & Ota, E. (2023). Tocolytic Therapy Inhibiting Preterm Birth in High-Risk Populations: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Children*, *10*(3), 443. https://doi.org/10.3390/children10030443

14. Lin, L. L., Hung, J. N., Shiu, S. I., Su, Y. H., Chen, W. C., & Tseng, J. J. (2023). Efficacy of prophylactic antibiotics for preterm premature rupture of membranes: a systematic review and network meta-analysis. *American journal of obstetrics & gynecology MFM*, *5*(7), 100978. https://doi.org/10.1016/j.ajogmf.2023.100978

15. Jain, V. G., Monangi, N., Zhang, G., & Muglia, L. J. (2022). Genetics, epigenetics, and transcriptomics of preterm birth. *American journal of reproductive immunology (New York, N.Y.: 1989)*, *88*(4), e13600. https://doi.org/10.1111/aji.13600

16. Sun, K., Wang, N., Liu, Y. & Gao, L. (2025). Regulation of term and preterm labor: genetics and epigenetics. *Front. Genet. 16*, 1594030. https://doi.org/10.3389/fgene.2025.1594030

17. Ahrodia, T., Yodhaanjali, J. R., & Das, B. (2022). Vaginal microbiome dysbiosis in preterm birth. *Progress in molecular biology and translational science*, *192*(1), 309–329. https://doi.org/10.1016/bs.pmbts.2022.08.001

18. Pinson, M. R., Tseng, A. M., Adams, A., Lehman, T. E., Chung, K., Gutierrez, J., Larin, K. V., Chambers, C., Miranda, R. C., & Collaborative Initiative on Fetal Alcohol Spectrum Disorders (2022). Prenatal alcohol exposure contributes to negative pregnancy outcomes by altering fetal vascular dynamics and the placental transcriptome. *Alcoholism, clinical and experimental research*, *46*(6), 1036–1049. https://doi.org/10.1111/acer.14846

19. Shapiro, G. D., Fraser, W. D., Frasch, M. G., & Séguin, J. R. (2013). Psychosocial stress in pregnancy and preterm birth: associations and mechanisms. *Journal of perinatal medicine*, *41*(6), 631–645. https://doi.org/10.1515/jpm-2012-0295

20. Kassenova, M. A., Ryskulova, A. R., Baimuratova, M. A., Sokolova, T. M., Adyrbekova, A. K., & Yesmakhanova, I. S. (2025). Novel Technologies in Preterm Birth Prediction: Current Advances and Ethical Challenges. *Journal of*

mother and child, *29*(1), 30–38. https://doi.org/10.34763/jmotherandchild.20252901.d-24-00048

References

1. Ohuma, E.O., Moller, A.B., Bradley, E., Chakwera, S., Hussain-Alkhateeb, L., Lewin, A., Okwaraji, Y.B., Mahanani, W.R. and Moran, A.C. (2023), "National, regional, and global estimates of preterm birth in 2020, with trends from 2010: a systematic analysis", Lancet, vol. 402, no. 10409, pp. 1261–1271. doi: https://doi.org/10.1016/S0140-6736(23)00878-4.

2. Vogel, J.P., Chawanpaiboon, S., Moller, A.B., Watananirun, K., Bonet, M. and Lumbiganon, P. (2018), "The global epidemiology of preterm birth", Best practice & research. Clinical obstetrics & gynaecology, vol. 52, pp. 3–12. doi: https://doi.org/10.1016/j.bpobgyn.2018.04.003.

3. World Health Organization (2022), WHO recommendations on: Antenatal corticosteroids for improving preterm birth outcomes, World Health Organization, Geneva, Switzerland.

4. Romero, R., Dey, S.K. and Fisher, S.J. (2014), "Preterm labor: one syndrome, many causes", Science, vol. 345, no. 6198, pp. 760–765. doi: https://doi.org/10.1126/science.1251816.

5. Tang, I.D., Mallia, D., Yan, Q., Pe'er, I., Raja, A., Salleb-Aouissi, A. and Wapner, R. (2024), "A Scoping Review of Preterm Birth Risk Factors", American journal of perinatology, vol. 41, no. S 01, pp. e2804–e2817. doi: https://doi.org/10.1055/s-0043-1775564.

6. Conde-Agudelo, A., Romero, R., Rehal, A., Brizot, M.L., Serra, V., Da Fonseca, E., Cetingoz, E., Syngelaki, A., Perales, A., Hassan, S.S. and Nicolaides, K.H. (2023), "Vaginal progesterone for preventing preterm birth and adverse perinatal outcomes in twin gestations: a systematic review and meta-

analysis", American journal of obstetrics and gynecology, vol. 229, no. 6, pp. 599–616.e3. doi: https://doi.org/10.1016/j.ajog.2023.05.010.

7. Wood, A.M., Dotters-Katz, S.K. and Hughes, B.L. (2019), "Cervical Cerclage versus Vaginal Progesterone for Management of Short Cervix in Low-Risk Women", American journal of perinatology, vol. 36, no. 2, pp. 111–117. doi: https://doi.org/10.1055/s-0038-1668547.

8. Roman, A., Ramirez, A. and Fox, N.S. (2022), "Prevention of preterm birth in twin pregnancies", American journal of obstetrics & gynecology MFM, vol. 4, no. 2S, p. 100551. doi: https://doi.org/10.1016/j.ajogmf.2021.100551.

9. Stock, S.J. and Bauld, L. (2020), "Maternal smoking and preterm birth: An unresolved health challenge", PLoS medicine, vol. 17, no. 9, p. e1003386. doi: https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1003386.

10. Boyer, T.M., Barrett, R.B., Xiong, C., Bu, F., Bhansali, R.A., Wallace, A.S., Fang, M., Vaught, A.J., Selvin, E., Hays, A.G., Michos, E.D., Ndumele, C.E. and Minhas, A.S. (2026), "Hypertensive Disorders of Pregnancy and Premature Cardiovascular Disease in a Diverse Cohort of Young US Women", Circulation, vol. 153, no. 7, pp. 480–492. doi: https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.125.078057.

11. Ramachandran, A., Clottey, K.D., Gordon, A. and Hyett, J.A. (2024), "Prediction and prevention of preterm birth: Quality assessment and systematic review of clinical practice guidelines using the AGREE II framework", International journal of gynaecology and obstetrics, vol. 166, no. 3, pp. 932–942. doi: https://doi.org/10.1002/ijgo.15514.

12. Roberts, D., Brown, J., Medley, N. and Dalziel, S.R. (2017), "Antenatal corticosteroids for accelerating fetal lung maturation for women at risk of preterm birth", The Cochrane database of systematic reviews, vol. 3, no. 3, p. CD004454. doi: https://doi.org/10.1002/14651858.CD004454.pub3.

13. Yamaji, N., Suzuki, H., Saito, K., Swa, T., Namba, F., Vogel, J.P., Ramson, J.A., Cao, J., Tina, L. and Ota, E. (2023), "Tocolytic Therapy Inhibiting Preterm Birth in High-Risk Populations: A Systematic Review and Meta-Analysis", Children, vol. 10, no. 3, p. 443. doi: https://doi.org/10.3390/children10030443.

14. Lin, L.L., Hung, J.N., Shiu, S.I., Su, Y.H., Chen, W.C. and Tseng, J.J. (2023), "Efficacy of prophylactic antibiotics for preterm premature rupture of membranes: a systematic review and network meta-analysis", American journal of obstetrics & gynecology MFM, vol. 5, no. 7, p. 100978. doi: https://doi.org/10.1016/j.ajogmf.2023.100978.

15. Jain, V.G., Monangi, N., Zhang, G. and Muglia, L.J. (2022), "Genetics, epigenetics, and transcriptomics of preterm birth", American journal of reproductive immunology, vol. 88, no. 4, p. e13600. doi: https://doi.org/10.1111/aji.13600.

16. Sun, K., Wang, N., Liu, Y. and Gao, L. (2025), "Regulation of term and preterm labor: genetics and epigenetics", Frontiers in Genetics, vol. 16, p. 1594030. doi: https://doi.org/10.3389/fgene.2025.1594030.

17. Ahrodia, T., Yodhaanjali, J.R. and Das, B. (2022), "Vaginal microbiome dysbiosis in preterm birth", Progress in molecular biology and translational science, vol. 192, no. 1, pp. 309–329. doi: https://doi.org/10.1016/bs.pmbts.2022.08.001.

18. Pinson, M.R., Tseng, A.M., Adams, A., Lehman, T.E., Chung, K., Gutierrez, J., Larin, K.V., Chambers, C., Miranda, R.C. and Collaborative Initiative on Fetal Alcohol Spectrum Disorders (2022), "Prenatal alcohol exposure contributes to negative pregnancy outcomes by altering fetal vascular dynamics and the placental transcriptome", Alcoholism, clinical and experimental research, vol. 46, no. 6, pp. 1036–1049. doi: https://doi.org/10.1111/acer.14846.

19. Shapiro, G.D., Fraser, W.D., Frasch, M.G. and Séguin, J.R. (2013), "Psychosocial stress in pregnancy and preterm birth: associations and mechanisms", Journal of perinatal medicine, vol. 41, no. 6, pp. 631–645. doi: https://doi.org/10.1515/jpm-2012-0295.

20. Kassenova, M.A., Ryskulova, A.R., Baimuratova, M.A., Sokolova, T.M., Adyrbekova, A.K. and Yesmakhanova, I.S. (2025), "Novel Technologies in Preterm Birth Prediction: Current Advances and Ethical Challenges", Journal of mother and child, vol. 29, no. 1, pp. 30–38. doi: https://doi.org/10.34763/jmotherandchild.20252901.d-24-00048.

Kremer Iryna Petrivna, Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electronic Engineering, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2362-1195

Tymkovych Rostyslav Igorovich, postgraduate student Department of Electronic Engineering, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6007-9236

OPTICAL SENSORS IN DEVICES AND SYSTEMS FOR FUNCTIONAL MONITORING

Abstract

In the conditions of the long-term russian aggression against Ukraine, the number of people with disabilities among the military and civilians is rapidly increasing. This creates a critical need for innovative, objective methods for monitoring the rehabilitation process. A key indicator of functional mobility is gait, whose parameters allow the diagnosis of the consequences of musculoskeletal injuries, amputations, and neuromuscular diseases. Traditional methods are often subjective or too expensive, prompting the search for new technological solutions that leverage optical sensors.

The purpose of the work is to study and systematize existing scientific developments on the use of optical sensors in monitoring gait parameters of people with disabilities.

Results. It is studied that gait analysis is considered as a comprehensive study of functional mobility, which plays a key role in the assessment of physical rehabilitation, diagnosis of disorders, and decision-making regarding further rehabilitation interventions. Two main categories of optical systems are analyzed: marker-based, which have ultra-high accuracy (error<1*mm*), but are limited to

laboratory conditions; and marker-free, based on computer vision, which allow for analysis in the natural environment. Particular attention is paid to fiber-optic technologies, in particular sensors based on Bragg gratings and Fabry-Perot interferometers. It is proven that fiber-optic sensors are the most promising for wearable monitoring devices, since they provide non-invasiveness, lack of physical contact, resistance to electromagnetic interference, and high biocompatibility, implementing real-time monitoring.

Conclusions. The use of optical sensors in devices and control systems fundamentally changes the approach to monitoring rehabilitation effects, providing permanent and high-precision monitoring without limiting the mobility of people with disabilities. The use of optical sensors in devices and control systems provides permanent control without limiting motor activity and wireless data transmission. Miniaturization of devices makes them portable and convenient for long-term wear. High accuracy of measurements of kinematic and kinetic parameters is critical for diagnosing disorders and making decisions about further rehabilitation. Prospects for further research into the use of new materials, such as liquid crystal light guides in optical sensors, to create even more adaptive control systems.

Keywords: gait analysis, optical sensors, fiber-optic optics, marker optical systems, markerless optical systems, Bragg gratings, Fabry-Perot interferometer.

Problem statement

Due to the long-term russian aggression against Ukraine, the number of people with disabilities among military and civilian personnel is constantly growing. As a result, the need to ensure the effectiveness of rehabilitation services in the country is extremely urgent.

Today, the control of the rehabilitation process is the subject of a wide range of fundamental and applied research in various fields of knowledge. Effective

control of the functional mobility of people with disabilities has been recognized by scientists [1, 4] as fundamental, since injuries that cause disability generally lead to impaired locomotor functions for performing most everyday activities.

In this aspect, the analysis of gait parameters is singled out [13, 14] as one of the promising solutions for ensuring the effectiveness of rehabilitation of people with disabilities with a certain list of functional mobility disorders. Such disorders are a direct consequence of injuries and diseases of the musculoskeletal system, cardiovascular and neuromuscular diseases, lower limb amputations, explosive craniocerebral injuries, as well as evidence of the presence of other pathologies, such as ulcers or diabetes [2, 3]. From the point of view of analyzing gait patterns, changes in their normal parameters can reveal key information about the quality of life of people with disabilities or the development of various diseases.

Analysis of recent research and publications

It is argued [1] that objective assessment, diagnosis and prediction of the rehabilitation process requires simultaneous measurement of a significant list of parameters. It has been proven [7, 10] that the creation of new technical modern control tools is aimed at ensuring objectivity and impartiality, analysis and prediction of rehabilitation process data. The use of sensor technologies in monitoring the rehabilitation process has been widely studied in recent years from various points of scientific knowledge [1-3, 14].

The feasibility of using optical sensors in monitoring devices has been established [4]. Optical sensors are considered [12] to be flexible, lightweight, and immune to electromagnetic interference, and therefore suitable for use in wearable monitoring devices [6].

Many sensors in wearable devices can help record walking and running data; spatiotemporal and kinematic variables can be additionally calculated in gait analysis [13]. The use of wearable devices for motion tracking, gait analysis, and

their potential to improve healthcare practices through intelligent data analysis have been reviewed [1, 4, 13].

In motion analysis systems, purely mechanical measurement has been supplemented by optical [2] in recent years. In the context of gait monitoring, they now allow for the highest accuracy in a non-contact manner [13]. Optoelectronic sensors have a key advantage: the complete absence of physical contact [9].

The possibilities of optical sensors are constantly being studied in the direction of their improvement [7, 8]. In particular, today the measurement methodology is based not only on measuring the physical properties of the environment, but also on the analysis of both organic and inorganic properties [11].

It has been studied [2, 12] that optical sensors can detect defects in gait parameters, their deviations, and inconsistencies in patterns with exceptional accuracy. The high resolution of modern optical sensors allows detecting gait disorders at high speed, while maintaining the accuracy standards necessary for the implementation of mass studies [14]. It is extremely important that improved optical sensors are integrated into machine learning programs [13].

However, the analysis of existing approaches to controlling gait parameters led to the conclusion that there is currently no universal solution for controlling disabilities using optical sensors.

Purpose of the article

is to study and systematize existing scientific developments on the use of optical sensors in monitoring gait parameters of persons with disabilities.

Presentation of the main material of the study

The current level of scientific research, which provides an assessment of gait as the basis of human movement, involves a shift in emphasis from a generalized approach to a targeted, individualized, and data-based strategy of rehabilitation interventions, ensuring the effectiveness of such activities. Studying

the spectrum of use of optical sensors in devices and control systems, we aim to clarify the state of their application, purpose, and capabilities that determine the feasibility of this process and its clinical significance. For persons with disabilities, optoelectronic sensors have a key advantage: the complete absence of physical contact.

In recent years, many instrumental systems have been developed to monitor gait parameters of persons with disabilities. In fact, it is the integration of all possible potentials of electronic devices, sensors, and wireless devices, which creates a complex, but at the same time powerful opportunity for the formation of control devices.

In my opinion, gait analysis should be considered as a comprehensive study of functional mobility, which, as noted earlier, plays an important role in the assessment of physical rehabilitation, diagnosis of disorders, and decision-making regarding further rehabilitation interventions. Usually, gait analysis of patients is carried out using video technologies or other expensive platforms based on force-resistive sensors [14].

It is extremely important that optical systems allow for permanent control that does not limit the motor activity of people with disabilities [13]. Optical sensors in devices and systems for controlling gait parameters are divided into two large categories depending on their placement.

Optical motion capture systems, such as Optical Motion Capture, MoCap, Vicon, and OptiTrack. Such systems are based on the use of specialized infrared or video cameras to track light-reflecting passive or light-emitting active markers placed on the human body. These systems record and track reflective markers in real time, reaching frequencies up to 2000 *Hz* Infrared cameras fix the position of the markers in space and record a digital signal of their movements [1, 10].

The principle of operation of such systems involves placing optical sensors around the perimeter of the observation site so as to ensure coverage of the control

object. The sensors are connected without a wire connection to a microcontroller, which controls the sensors and connects in real time to the interface (Fig. 1).

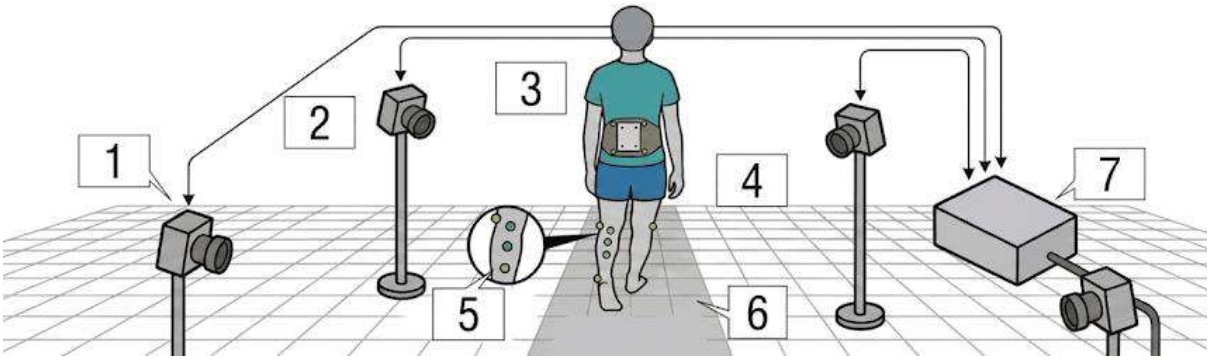


Fig. 1. Scheme optical motion capture systems: 1 – optical sensors; 2 – wire connection; 3 – human; 4 – observation; 5 – active markers; 6 – track 7 – microcontroller

Among the main advantages of such systems is a high level of accuracy: an error of<1 *mm*, which meets the needs of most high-speed motion measurements [10]. In addition, the unlimited range of movements, the absence of cables and mechanical devices make these systems convenient to use.

At the same time, the high cost of optical motion capture systems, the complexity of setup, the influence of soft tissue motion artifacts, and the sensitivity to lighting and reflections of optical sensors complicate their widespread use. Calibration of such systems is also very difficult. And the measurement errors of internal-external rotation of joints during walking can reach 21.8 [4].

Therefore, despite their accuracy, their use is mainly limited to laboratory conditions. This limitation is associated with spatial requirements, the need for precise camera positioning, and the complexity of device calibration [6].

The second group is optical systems without markers (Markerless)

A modern trend based on computer vision and deep learning algorithms. A markerless system does not require the use of reflective markers on the study objects, reducing preparation time and potential discomfort.

Compared to marker-based systems, marker-free technology offers: the use of standard video cameras to determine key points of the skeleton, RGB-D cameras: Cameras that measure the distance to the object (e.g., Microsoft Kinect, Intel RealSense).

The main advantage of such systems is the ability to conduct gait analysis in natural conditions, and the absence of discomfort for control subjects. They provide a re-analysis of control data using updated pose estimation algorithms. Marker-free systems make it possible to collect data, however, as research has shown, the true accuracy of marker-free systems is unknown [4].

In the following, we will detail our scientific search. In control systems and devices, optical sensors are used for:

– an automated method of segmenting body movements during walking;

– a flexible optical fiber goniometer, primarily for monitoring human joint movements;

– a wearable device that integrates sensors based on polymer optical fiber into a knee pad to track knee flexion/extension cycles during walking;

– measurement of joint motion parameters, which allows determining both the bending angle and its orientation using fiber-optic sensors [5, 12].

Special attention will be paid to the use of fiber-optic sensors with Fiber Bragg gratings. In particular, in [2] the development and implementation of a non-invasive architecture of a wearable device for complete gait analysis, provided by optical fiber-optic sensors with Fiber Bragg gratings, is presented.

The developed sensor network provides simultaneous control of gait parameters. Among these are foot pressure, full control of movement in the ankle

and knee joints. At the same time, a high level of accuracy is ensured, without the need for any synchronization with fiber-optic sensors with Fiber Bragg gratings.

Fiber Bragg gratings are sensitive elements of the sensor, the principle of which is to monitor the shift of the wavelength (λ) Bragg, reflected by the grating, as a function of the controlled parameter.

Another type of fiber-optic sensors used in devices and control systems is sensors based on Fabry-Perot interferometers. It has been studied [8] that they have a high level of efficiency and accuracy, are easy to manufacture and inexpensive. Their use in control devices includes kinematic analysis: joint angles, angular velocities and accelerations, and kinetic analysis during gait cycles ((Fig. 2).

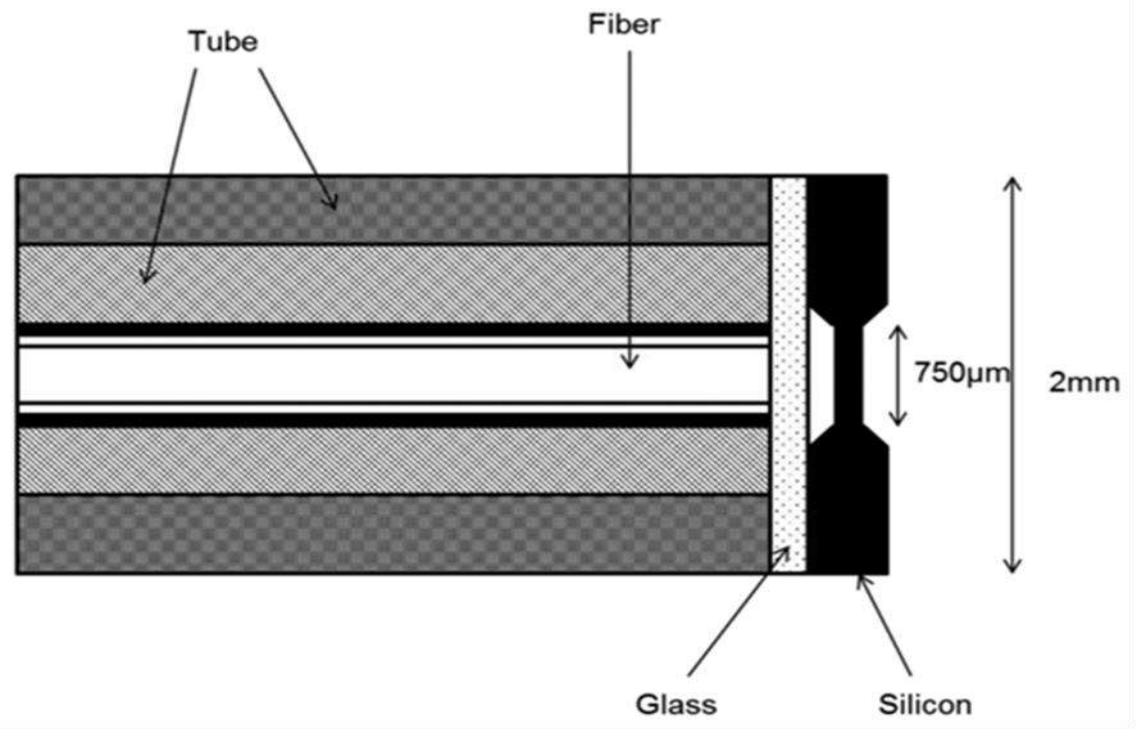


Fig 2. Schematic of a sensor structure. The light is sent and received through the 100 µm core fiber. The cavity length is about 7 µm and the thickness of the membrane is 8 µm [8].

Today, the possibilities of optical signal processing and network technologies will allow creating high-density fiber-optic sensor networks. The production of Fabry-Perot interferometer sensors consists of processing an optical fiber, previously

damaged by the welding effect, to form an embedded microcavity FPI. There are opinions [5, 7, 8] that FPI sensors have significant potential in the design of a wide range of control devices.

Another use of optical sensors is the possibility of control using optical fibers with controlled birefringence, formed as a result of the introduction of liquid crystal material into the internal cavity of fiber optic fibers [8]. However, in the current developments of gait control devices, this is not considered.

In general, non-invasive measurement methods using optical fibers have significant advantages over electrogoniometers and control systems. Among the key advantages: resistance to electromagnetic interference, miniature size and flexibility of the design [5].

Analysis of scientific data [5, 7, 8] allows us to highlight the advantages of fiber-optic sensors compared to electronic counterparts. First of all, the use of dielectric materials in their design ensures insensitivity to electric and magnetic fields. In addition, they are resistant to most chemical reagents and ionizing radiation. Fiber-optic sensors can be adapted to measure various physical quantities, and they are relatively inexpensive to manufacture.

The list of advantages of optical sensors also includes:

– miniaturization: allows them to be integrated into compact devices without loss of efficiency, ensuring user convenience;

– high density of data transmission over long distances without distortion;

– insensitivity to electromagnetic and radiation fields;

– manufacturability: the possibility of using integrated technologies in manufacturing.

Additional advantages of optical sensors are their portability, low cost and ease of integration into microsystems, on the order of micrometers, structures. Important characteristics are also biocompatibility and the possibility of multiplexing into a single network [2].

Conclusions

Based on the results of studying existing developments in the use of optical sensors in the analysis of gait parameters of people with disabilities, the following key provisions can be formulated.

The use of optical sensors in electronic devices fundamentally changes the approach to monitoring the gait parameters of people with disabilities. The transition from periodic procedures to continuous, intelligent and personalized support allows to significantly increase the objectivity and impartiality of diagnostics and to minimize the influence of the human factor.

Modern gait assessment is moving from general methods to individualized strategies based on accurate data. This allows to create targeted rehabilitation plans, where objective control of the studied parameters plays a key role.

It has been studied that optical systems for monitoring gait parameters are divided into two main categories: marker and markerless. Marker systems are determined with ultra-high accuracy (error<1 *mm*), but are limited to laboratory conditions due to high cost, complexity of calibration and sensitivity to light. The main advantage of markerless systems is the possibility of analysis in natural conditions without discomfort for the control subject, although the question of their absolute accuracy remains open

The following are highlighted in the list of technological advantages of fiber-optic sensors. The use of fiber optics, in particular sensors based on Bragg gratings and Fabry-Perot interferometers, in control systems is one of the most

promising areas due to the complete absence of physical contact, insensitivity to electromagnetic and radiation fields, which allows them to be used in complex environments. In addition, they can be embedded in clothing, knee pads, shoes for simultaneous control of foot pressure and joint flexion angles.

In general, the use of optical sensors in control devices and systems provides: permanent control without limiting motor activity and wireless data transmission. Miniaturization of devices makes them portable and convenient for long-term wear. High accuracy of measurements of kinematic and kinetic parameters, which is critical for diagnosing disorders and making decisions about further rehabilitation.

Prospects for further research include studying the use of new materials, such as liquid crystal light guides in optical sensors to create even more effective systems for monitoring rehabilitation effects.

References

1. Barkovska, O., Kovalenko, A., Oliinyk, D., Ruskikh, O., & Sedlaček, P. (2025). Study Of Methods For Detecting Optical Markers In The System Of Human Gait And Posture Analysis. *Advanced Information Systems*, *9*(3), 73–82. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.3.09

2. Domingues, M.F., Tavares, C., Nepomuceno, A.C., Alberto, N., André, P., & Antunes, P. (2021). Non-Invasive Wearable Optical Sensors for Full Gait Analysis in E-Health Architecture. *IEEE Wireless Communications*, *28*(3), 28–35, https://doi.org/10.1109/MWC.001.2000405

3. de Fátima Domingues, M., Tavares, C., Leite, T., Alberto, N., Leitão, C., Marques, C., Radwan, A., Rocon, E., Antunes, P., & André, P. (2019). Fiber Bragg Gratings as e-Health Enablers: An Overview for Gait Analysis Applications. In Applications of Optical Fibers for Sensing. *IntechOpen*. https://doi.org/10.5772/intechopen.81136

4. Fiorentino,N.M.,Atkins, P.R., Kutschke, M.J., Goebel, J.M., Foreman, K.B., Anderson, A.E. (2017). Soft tissue artifact causes significant errors in the calculation of joint angles and range of motion at the hip. *Gait & Posture, 55,* 184–190 https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.03.033

5. Grattan, K.T., Meggitt, B.T. *Optical Fiber Sensor Technology*. Kluwer Academic Publisher: Boston, MA, USA, 2000.

6. Gutierrez, M., Gomez, B., Retamal, G., Peña, G., Germany, E., Ortega-Bastidas, P., & Aqueveque, P. (2024). Comparing Optical and Custom IoT Inertial Motion Capture Systems for Manual Material Handling Risk Assessment Using the NIOSH Lifting Index. *Technologies*, *12*(10), 180. https://doi.org/10.3390/technologies12100180

7. Hirsch, M., Majchrowicz, D., Wierzba, P., Weber, M., Bechelany, M., & Jędrzejewska-Szczerska, M. (2017). Low-Coherence Interferometric Fiber-Optic Sensors with Potential Applications as Biosensors. *Sensors, 17*(2), 261. https://doi.org/10.3390/s17020261

8. Islam, M. R., Ali, M. M., Lai, M.-H., Lim, K.-S., & Ahmad, H. (2014). Chronology of Fabry–Perot interferometer fiber-optic sensors and their applications: A review. *Sensors*, 7451–7488. https://doi.org/10.3390/s140407451

9. Mykytyuk, Z., Kohut, I., Kachurak, Y., Vistak, M., Blavt, O., Kremer, I., Shymchyshyn, O., Tymkovych, R. (2025). Changes in the spectral characteristics of the liquid crystalline active medium doped with multi-walled carbon nanotubes under the influence of nitrogen dioxide. *Physics and chemistry of solids*, *26*(1), 23–28.

10. Park C., An Y., Yoon H., Park I., Kim K., Kim C., & Cha Y. (2022). Comparative accuracy of a shoulder range motion measurement sensor and Vicon 3D motion capture for shoulder abduction in frozen shoulder. *Technology and Health Care,* 30(S1), 251–257. https://doi.org/10.3233/thc-228024

11. Pavlov, S.V., Prosolovsky, R.V., & Kozlovska, T.I. (2008). Use of fiber-optical sensors in biomedical research. *Biomedical optoelectronic systems and devices, 154-159 [in Ukrainian]*

12. Pugliese, B. L. *et al*. (2025). Development of a Wearable Sleeve-Based System Combining Polymer Optical Fiber Sensors and an LSTM Network for Estimating Knee Kinematics. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 33, 728-738. https://doi.org/10.1109/TNSRE.2025.3540708

13. Saboor, A., Kask, T., Kuusik, A., Alam, M. M., Le Moullec, Y., Niazi, I. K. & Ahmad, R. (2020). Latest research trends in gait analysis using wearable sensors and machine learning: A systematic review. *Ieee Access*, 8, 167830–167864, https://doi.org/10f.1109/ACCESS.2020.3022818

14. Wade, L., Needham, L., McGuigan, P., & Bilzon, J. (2022). Applications and limitations of current markerless motion capture methods for clinical gait biomechanics. *PeerJ 10*, e12995 https://doi.org/10.7717/peerj.12995

Kudermina Olena Ivanivna, doctor of Psychology, professor, professor of the department of legal psychology, National academy of internal affairs, Kyiv, Ukraine, https://orcid.org/0000-0002-4959-7413

Skakun Iryna Volodymyrivna, candidate of Law, National academy of internal affairs, Kyiv, Ukraine, https://orcid.org/0000-0002-5074-2323

PECULIARITIES OF EMOTIONAL-VOLITIONAL SELF-REGULATION OF POLICE OFFICERS UNDER MARTIAL LAW

Abstract

The full-scale armed aggression against Ukraine has radically transformed the functional profile of the National Police. Today, a police officer is not only a law enforcement agent but also an integral part of the security and defense sector, participating in stabilization measures, evacuations, and combat operations. This shift demands a boundary level of self-regulation under permanent threats and multi-factor stress. Emotional-volitional regulation has become the primary guarantor of professional reliability—the ability to make balanced decisions amidst fatigue, anger, or fear.

The purpose of this article is to identify the psychological characteristics of law enforcement officers' emotional-volitional self-regulation during martial law. The study involved 62 police officers (3–8 years of service). A battery of methodologies was utilized: CERQ (cognitive regulation), EQI (emotional intelligence), GSE (self-efficacy), and SSPM (general self-regulation style).

The empirical results revealed a specific "executive-mobilizing" personality profile. The cognitive component is the most stable: the dominance of "Refocus on Planning" (16.4 points) and "Positive Reappraisal" (15.2 points) indicates well-established reframing mechanisms. Officers perceive danger as a professional challenge, which minimizes manifestations of catastrophizing. The emotional

sphere is defined as dysharmonious. High self-motivation (14.2 points) is coupled with a critically low level of emotion management (7.4 points). This creates a risk of energy depletion: officers are proficient at "pressing the gas" but possess "weak brakes" regarding stress deactivation. The volitional link (self-efficacy—32.8 points) acts as a buffer, where the belief in one's own capability prevents systemic collapse through intense volitional effort.

The general style of self-regulation is based on hyper-mobilization. A deficit in the "Evaluation of Results" scale (5.4 points) indicates a decrease in criticality toward one's own internal states. Self-regulation operates on the principle of "task completion at any cost," where external efficiency is achieved by ignoring internal signals of exhaustion. This creates prerequisites for systemic burnout, necessitating the implementation of specialized emotional recovery programs.

Keywords: self-regulation, emotional-volitional resilience, police officers, martial law, self-efficacy, executive-mobilizing style, professional burnout, cognitive strategies, professional reliability.

*Problem statement***.** The full-scale armed aggression against Ukraine has radically changed the functional profile of the National Police. Today, a police officer is not only a law enforcement officer but also a member of the security and defense sector, participating in stabilization measures, population evacuation, documentation of war crimes, and direct combat. This transformation requires an ultra-high level of self-regulation under permanent threats to life and health. Service during martial law is characterized by 'crisis multitasking and time deficits. Police officers face multifactorial stress, from physical exhaustion to ethical dilemmas. In these conditions, emotional-volitional regulation becomes the primary guarantor of professional reliability – the ability to make balanced decisions even when overwhelmed by fear, anger, or fatigue.

Analysis of recent research and publications. The issue of emotional-volitional regulation has been studied by numerous foreign and domestic scholars, including A. Bandura, R. Baumeister, I. Bekh, H. Heckhausen, P. Gollwitzer, D. Goleman, J. Gross, T. Kyrylenko, O. Kokun, J. Kuhl, D. Mayer, S. Maksymenko, P. Salovey, M. Savchyn, and others. Research on self-regulation in extreme conditions and policing has been conducted by Yu. Boiko-Buzyl, M. Budanova, M. Halych, O. Kudermina, V. Osiodlo, S. Polishchuk, and others. At the same time, most classical domestic and foreign studies of law enforcement self-regulation were based on peacetime experience or local conflicts. The current Ukrainian situation is unique in the intensity and scale of its stressors. There is an urgent scientific need for empirical data reflecting the actual psychological state and emotional-volitional regulation mechanisms of Ukrainian police officers during 2022–2026.

Purpose of the article is to identify the psychological characteristics of the emotional-volitional regulation of police officers during martial law.

Presentation of the main material of the study. A theoretical analysis of scientific primary sources [1, 2, 3, 4] suggests that a police officer's emotional-volitional self-regulation under martial law is an integrated, multilevel system of mental activity based on the synergy of cognitive flexibility, emotional resilience, and volitional self-efficacy. It ensures the transformation of external normative requirements into internal personal beliefs (the process of interiorization), allowing the law enforcement officer to transition from the role of an object of management to the status of an autonomous agent, capable of functioning effectively under a deficit of external control and extreme stress.

The system's effectiveness is determined by three fundamental determinants: the cognitive, which through reappraisal forms «psychological armor»; the emotional, which via somatic markers maintains the state within the «window of tolerance»; and the volitional, which ensures the transition from

intention to action despite exhaustion. Developing self-regulation is key to professional reliability and mental health, requiring specialized training programs to temper these internal resources.

To empirically study the peculiarities of emotional-volitional self-regulation in law enforcement officers during martial law, we formed a sample of respondents and selected psychodiagnostic tools. The participants were 62 police officers with 3–8 years of service in the National Police of Ukraine (13 women, 49 men; aged 22–34).

To investigate the determinants of self-regulation, we compiled a battery of psychodiagnostic tools covering the cognitive, emotional, and volitional spheres of the law enforcement officer's personality. The cognitive block is aimed at identifying strategies through which a police officer interprets stressful events and plans their activities. To study this, we utilized the «Cognitive Emotion Regulation Questionnaire» (CERQ) by N. Garnefski. This tool allows for the differentiation between adaptive strategies (cognitive reappraisal, refocus on planning, acceptance) and maladaptive ones (catastrophizing, self-blame). The emotional block allows for the assessment of affective resources and the level of stress load experienced by personnel. For the empirical study of emotional determinants, we used N. Hall’s «Emotional Intelligence Questionnaire» (EQI). This method is aimed at identifying the officer's ability to recognize and manage their own emotional states. The volitional block focuses on the ability to actively initiate actions and sustain effort. To investigate the volitional determinants of the emotional-volitional self-regulation of police officers, we used the «General Self-Efficacy Scale» (GSE) by R. Schwarzer and M. Jerusalem. This scale measures a police officer's belief in their ability to act successfully in difficult and unpredictable circumstances. We consider self-efficacy as the primary volitional predictor of active behavior during a crisis. To obtain a holistic picture, we utilized a methodology that integrates all components into a single index: V.

Morosanova's «Style of Behavior Self-Regulation Questionnaire» (SSPM). It serves as a fundamental instrument for assessing the general level of self-regulation, allowing for the detailing of specific regulatory processes: goal planning, modeling of significant conditions, programming of actions, and evaluation of results.

The first stage of our empirical research involved analyzing the cognitive emotion regulation strategies among police officers. The obtained data allow us to determine which specific cognitive operations police officers utilize to cope with stressful events under martial law conditions. A qualitative analysis of the obtained data indicates the prevalence of adaptive strategies in the self-regulation structure of the studied police officers (the predominance of the «Refocus on planning» strategy (16,4 points); a high level of «Positive reappraisal» (15,2 points), and the «Acceptance» strategy (14,8 points). An analysis of maladaptive strategies reveals that the scores for «Catastrophizing» (7,5 points) and «Blaming others» (6,8 points) are at a low level. This serves as a positive indicator of professional aptitude, as it demonstrates emotional resilience and a lack of propensity for the irrational exaggeration of threats.

The identified dominance of the «Refocus on planning» strategy in the studied sample suggests that the cognitive component of the police officers' self-regulation functions according to a pragmatic type. This indicates a high level of internalization of professional algorithms, where the cognitive processing of a stressor culminates not in emotional rumination, but in the development of specific steps to overcome the crisis situation. Such a characteristic serves as the foundation for volitional mobilization, as the presence of a clear action plan minimizes cognitive load during critical decision-making.

A detailed analysis of the «Positive reappraisal» strategy (15,2 points) suggests that this specific mechanism serves as a «bridge» between cognitive

stress processing and emotional resilience. While «Planning» is responsible for action, «Positive reappraisal» is responsible for meaning.

The high prevalence of this strategy (15,2 points) among the participants indicates the well-developed nature of cognitive reframing mechanisms, which is a key factor in the resilience of personnel. Police officers demonstrate an ability to assign positive meaning to extreme working conditions, viewing them as a factor in personal and professional self-improvement. This allows for the neutralization of the destructive impact of traumatic events at the early stages of perception, significantly reducing the psychophysiological «cost» of self-regulation and preventing the development of secondary traumatization and emotional exhaustion.

The high level of the «Acceptance» strategy (14,8 points) within the self-regulation structure of the police officers indicates the presence of a psychological mechanism for accepting the uncontrollable parameters of extreme situations. This strategy acts as a buffer, preventing the disorganization of performance caused by emotional resistance to the objective threats of martial law. For the officers studied, acceptance serves as the initial stage of the adaptation process, which allows for the stabilization of their emotional state and creates a cognitive foundation for transitioning to constructive action planning. This minimizes the risk of developing maladaptive states and facilitates the preservation of a high level of functionality under conditions of chronic stress.

Analysis of maladaptive cognitive regulation strategies revealed an overall trend toward the minimization of non-constructive cognitive operations within the sample. The lowest scores were recorded on the «Blaming others» (6,8 points) and «Catastrophizing» (7,5 points) scales, indicating a realistic perception of war-related threats and a high level of professional responsibility among the personnel. However, the identified moderate level of «Rumination» (10,4 points) points to a tendency among some officers to fixate on negative experiences following the

conclusion of extreme situations. We have identified this strategy as a primary cognitive risk factor for the development of delayed stress disorders.

The results of this research stage suggest that the sample of police officers is characterized by a well-established adaptive cognitive profile. The combination of high scores in planning and positive reappraisal, alongside low levels of catastrophizing, creates a reliable cognitive foundation for emotional-volitional self-regulation. However, the presence of a moderate level of «Rumination» indicates that a portion of the officers is prone to the intrusive dwelling on past negative experiences, which could serve as a target for future psychocorrectional interventions. The analysis of maladaptive (non-constructive) strategies within the police sample is critical for predicting the risks of professional deformation and the emergence of psychosomatic disorders. While the overall profile of the sample remains adaptive, moderate indicators on certain non-constructive scales highlight «vulnerability zones» among the personnel.

An analysis of the emotional intelligence research results (based on N. Hall's EQi methodology) indicates that police officers operating under martial law conditions exhibit a specific profile, where high pragmatic motivation is coupled with difficulties in emotional relaxation.

The analysis of the results obtained for the individual scales indicates the following:

1. Self-motivation (14,2 points) is the dominant scale, representing the highest score compared to all other scales. This indicates a high capacity among police officers for volitional mobilization through the emotional reinforcement of goals. These officers are capable of channeling their emotions toward task performance, even in the presence of fatigue or fear.

2. Recognition of the emotions of others (13,8 points). This high result is driven by professional specificity. Police officers are trained to «read» non-verbal signals of threat, aggression, or insincerity. In wartime conditions, this skill

becomes heightened due to safety concerns at checkpoints, during filtration measures, or during arrests.

3. Emotional awareness (10,6 points). This moderate level indicates that while police officers generally understand what they are feeling, they tend toward a certain distancing from their own emotions. This serves as a «professional filter» that prevents them from fully absorbing the horrors of war-related events; however, it may also hinder the timely detection of burnout signs.

4. Empathy (9,2 points). This score sits at the lower bound of the average range. It reflects a psychological defense mechanism – «detachment». Given the frequent contact with significant human suffering (evacuations, fatalities), excessive empathy would lead to rapid secondary traumatization. Consequently, police officers maintain the capacity for compassion primarily at a functional level rather than a deeply affective one.

5. Managing one's emotions (7,4 points). This is a identified risk zone and the lowest score among all scales. This indicates that police officers find it difficult to independently reduce their level of emotional arousal after a stressful event. This result explains the moderate «Rumination» score (10,4) observed in the previous methodology. Because officers cannot «switch off» an emotion, it transitions into intrusive thoughts. This suggests a weakening of the «volitional brake» (regulatory inhibition) due to chronic combat-related tension.

The analysis of police officers' emotional intelligence (N. Hall's methodology) has revealed a specific disproportion: a high level of pragmatic self-motivation and social perception is coupled with a deficit in self-emotion management skills. The identified low score on the «Managing one's emotions» scale (7,4 points) indicates a state of emotional rigidity and difficulty in restoring psychophysiological homeostasis after the completion of duty tasks. This confirms the hypothesis that the self-regulation of personnel under wartime conditions is carried out primarily through volitional effort (mobilization) rather than emotional

flexibility. This pattern creates a risk of rapid energy depletion within the system. It was established that while police officers possess high mobilization potential, they demonstrate an inability to effectively deactivate stress states. A low level of emotional flexibility against the backdrop of prolonged military-related strain leads to the fixation of negative affect, which is further evidenced by a tendency toward rumination. We define this result as a critical point of vulnerability in the self-regulation system, as the deficit in emotion management skills offsets the advantages of high self-motivation and creates direct prerequisites for the psychosomatization of stress and professional deformation of the personality.

Analysis of the research results regarding general self-efficacy indicates a high level of self-belief among police officers, which is essential for performing professional duties during the period of martial law. Our findings, obtained using the General Self-Efficacy Scale (GSE) by R. Schwarzer and M. Jerusalem, demonstrate that the mean score of 32,8 on the general self-efficacy index suggests that the majority of the surveyed officers possess a stable mindset toward success and confidence in their ability to overcome obstacles.

It is worth recalling that according to Albert Bandura's theory, high self-efficacy determines the level of effort an individual exerts toward achieving a goal. For a police officer, this implies that despite fatigue and emotional strain (as evidenced by the results of the previous methodologies), the officer does not surrender. The high score indicates that police officers perceive the complex tasks of war not as threats to be avoided, but as challenges to be mastered.

There is a clear correlation between high self-efficacy and the dominance of the «Refocus on planning» strategy (16,4 points) within the CERQ results, specifically:

- self-belief enables constructive cognitive processing: the logical chain follows a clear sequence: «I am confident that I can cope → therefore, I can focus

on constructing a plan». Confidence in one's own capabilities allows the cognitive apparatus to shift from emotional distress toward task-oriented solutions;

- preventative function: had self-efficacy been low, the officers would have been more likely to engage in «Catastrophizing». However, in our sample, we observe the opposite – an adaptive pattern, where high self-efficacy serves as a protective factor against irrational fear and cognitive disorganization.

A high level of self-efficacy serves as a psychological buffer. Despite the low scores on the «Managing one's emotions» scale (7,4 points), it is the belief in their own professional competence that prevents psychological collapse. These officers maintain their resilience not through emotional tranquility, but through a volitional conviction: «Who, if not me? I know I can do this». The obtained score of 32,8 points indicates that the experience of serving under martial law has forged a «hardened» self-efficacy in these officers. Having already navigated numerous critical situations, their confidence has been reinforced by the realization: «I have survived and prevailed in difficult conditions before; therefore, I will succeed next time as well».

Analysis of the results from the general self-efficacy scale (32,8 points) suggests that the police officer sample is characterized by a high level of cognitive-volitional confidence. It has been established that self-efficacy acts as a core determinant of self-regulation, compensating for the deficit in emotion management skills. The high score on this scale indicates an established mindset toward the active overcoming of difficulties and individual resilience to the extreme factors of martial law. Among the studied officers, self-efficacy is closely linked to adaptive cognitive strategies (planning and positive reappraisal), creating an integral system of psychological readiness for performing duty tasks under highly demanding conditions.

Based on the study of the cognitive, emotional, and volitional determinants of police officers' emotional-volitional self-regulation, we have outlined a «Profile

of professional resilience of law enforcement officers in wartime», which can be characterized as follows:

- cognitive component – «Robust»: police officers actively engage in action planning, demonstrate an acceptance of reality, and reappraise danger as a professional challenge rather than a paralyzing threat;
- emotional component – «Dysharmonious»: high motivation (the «accelerator» effect) is coupled with a critically low ability to relax and manage internal anger or anxiety (a deficit in «regulatory brakes»). This imbalance suggests that the system operates at high intensity without adequate recovery mechanisms;
- volitional component – «High»: there is a profound internal confidence in one's personal capability to act. This serves as the primary driver that sustains operational activity despite emotional strain.

Consequently, there is no need to enhance police officers' motivation or teach them planning skills (as they are already proficient in these areas). Rather, it is imperative to provide them with tools for emotional self-regulation to prevent sudden burnout caused by the excessive overdrive of their volitional activity.

The analysis of the results obtained via V. Morosanova's «Style of Behavior Self-Regulation» (SSPM) questionnaire constitutes the most comprehensive and summarizing stage of our empirical research. This methodology allows us to observe not isolated strategies, but rather an integral system illustrating how police officers plan, model, and adjust their activities under extreme conditions.

An analysis of the results from the Style of Behavior Self-Regulation (SSPM) questionnaire allows for an assessment of both the procedural components of self-regulation (planning, modeling, programming, and evaluation of results) and regulatory-personality traits (flexibility and autonomy).

The «Programming» (7,8 points) and «Planning» (7,2 points) scales exhibit high scores. These indicators are the highest within the sample, fully correlating

with the results from the CERQ methodology («Refocus on planning»). Police officers demonstrate a well-developed ability to elaborate detailed action algorithms. They do not merely set goals but possess a clear understanding of the sequence of steps required for their implementation. In wartime conditions, this manifests as «professional action automatism».

The «Modeling» scale (6,9 points): this high score reflects a well-developed ability to identify the significant conditions of a situation. This finding is further supported by the high scores recorded in the «Recognition of the emotions of others» scale. Police officers demonstrate an adequate assessment of external threats, the operational environment, and the resources currently at their disposal.

The «Autonomy» scale (6,5 points): an above-average score indicates the police officers' capacity for independent regulation without constant supervision from leadership. This aligns with the transition toward a «Self-system», as discussed in the theoretical framework. In the context of autonomous operations within de-occupied territories or combat zones, this quality is critical for survival.

The «Flexibility» scale (6,2 points): an average level of flexibility indicates that police officers can adapt to changes, but doing so requires significant effort. In wartime conditions, where the situation changes instantaneously, this resource often operates at the brink of exhaustion.

The «Evaluation of results» scale (5,4 points): this represents a notable weakness and is the lowest score among all scales. This scale is responsible for self-criticism and reflection. A low score suggests that police officers do not always adequately assess their own mistakes or their actual psychophysiological state. These findings explain the low scores previously observed on the «Managing emotions» (7,4 points) and «Emotional awareness» (10,6 points) scales. The officer is unable to adjust their behavior in a timely manner because their internal «result evaluation» system is focused exclusively on the external task rather than the internal state.

Summarizing the results of the SSPM methodology, it has been established that the overall level of self-regulation among the studied police officers is high (34,8 points), sustained by the compensatory development of the «Programming» and «Planning» scales. However, the identified deficit in the «Evaluation of results» scale (5,4 points) indicates a decrease in criticality regarding one's own states and errors during the course of activity. This confirms our hypothesis that the emotional-volitional self-regulation of law enforcement officers under wartime conditions is hyper-mobilizing in nature. In this model, external productivity is achieved by ignoring internal regulatory signals of exhaustion, prioritizing operational objectives over the preservation of the individual's psychological resources.

Conclusions. Based on the analysis of the conducted empirical study, we have outlined a psychological portrait of a police officer regarding the specifics of their emotional-volitional self-regulation in wartime. Accordingly, the following characteristics are immanent to police officers: regulatory style – «executive-mobilizing»: the system is geared toward the ideal formulation and execution of plans (high «Programming», «Planning», and «Self-efficacy»); source of activity: high «Self-motivation» and a profound belief in one's personal capability (agency); critical vulnerability: a deficit in internal feedback loops («Evaluation of results») and an inability to achieve emotional recovery («Management of emotions»). The self-regulation of police officers operates on the principle of «task completion at any cost». They are exceptionally effective as instruments of protection; however, they carry a high risk of an internal «systemic failure» (burnout), as the components of self-assessment and self-restoration remain inhibited.

References

1. Bondarchuk, M. T. (2016). Self-regulation of police officers' mental states as a condition for their effective performance of official tasks. *Pravo i Bezpeka [Law and Safety]*, (4), 115–120.

2. Voloshyna, V. O. (2025). The interconnection between emotional intelligence and volitional self-regulation of the individual. *Naukovi Zapysky Donetskoho Natsionalnoho Universytetu Imeni Vasylia Stusa [Scientific Notes of Vasyl Stus Donetsk National University]*, (14), 34–41.

3. Vorobiova, O., & Okhrimenko, I. (2025). Specifics of self-regulation in police officers with different lengths of professional service. *Yurydychna Psykholohiia [Legal Psychology]*, 1(36), 70–79.

4. Duchyminska, T. I., & Mykytiuk, M. Yu. (2023). Psychological features of a police officer's stress resistance under martial law conditions. *Psykholohichni Studii [Psychological Studies]*, (1), 35–40.

Nazaruk Viktoriia, student of higher medical education, Bukovinian State Medical University, Chernivtsi, Ukraine

Pecheriaha Svitlana, Candidate of Medical Sciences, assistant Department of Obstetrics, Gynecology and Perinatology, Bukovinian State Medical University, Chernivtsi, Ukraine, https://orcid.org/0000-0003-3884-9109

RATIONAL NUTRITION OF WOMEN DURING PHYSIOLOGICAL PREGNANCY

Abstract

Nutrition during pregnancy is one of the key modifiable factors determining the course of gestation and perinatal outcomes. The aim of this study was to summarize current scientific evidence on the characteristics of nutritional support in physiological pregnancy and to assess the role of macro- and micronutrients in shaping maternal and fetal health. The paper analyzes findings from recent systematic reviews, meta-analyses, and cohort studies, which confirm the significant impact of both the quantitative and qualitative composition of the diet on intrauterine development. It has been demonstrated that low dietary diversity and a high inflammatory potential of the maternal diet are associated with an increased risk of low birth weight and intrauterine growth restriction. The crucial role of macronutrients has been established: adequate protein intake is essential for fetal tissue growth, the quality of dietary fats influences the development of the nervous system, and carbohydrates ensure stable energy balance. Particular attention is given to micronutrients, including folates, iron, iodine, vitamin D, and choline, which are involved in organogenesis, neurodevelopment, and metabolic programming. It is substantiated that nutrient deficiencies or imbalances during pregnancy may lead to obstetric complications and adversely affect long-term child health outcomes. At the same time, rational, balanced, and diverse nutrition

is considered an effective tool for the prevention of intrauterine developmental disorders. The need for an individualized approach to nutritional support for pregnant women is emphasized, taking into account metabolic demands, regional characteristics, and lifestyle factors. Thus, optimization of nutrition during pregnancy is an essential component of modern prenatal care and is aimed at improving both short-term and long-term health outcomes for the mother and child.

Keywords: maternal nutrition, physiological pregnancy, macronutrients, micronutrients, healthy diet, birth weight, perinatal outcomes.

Problem statement. Modern approaches to the management of physiological pregnancy identify nutrition as one of the key modifiable factors that directly influences the course of gestation and perinatal outcomes. Despite the availability of numerous recommendations, the issue of optimizing nutritional support for pregnant women remains relevant, which is associated with the high prevalence of both deficient and imbalanced diets, insufficient awareness of diet quality, and the lack of an individualized approach to nutritional care. Particular importance is attributed not only to the quantitative but also to the qualitative composition of the diet, including its diversity, inflammatory potential, and adequacy of macro- and micronutrient intake, which necessitates further synthesis of current scientific evidence and its implementation into clinical practice.

Analysis of recent research and publications. Recent studies confirm the significant role of maternal diet quality in shaping perinatal outcomes. In particular, the systematic review and meta-analysis *Association between maternal dietary diversity during pregnancy and birth outcomes* conducted by Amare Abera Tareke et al. (2024) demonstrated that low dietary diversity is associated with an increased risk of low birth weight and intrauterine growth restriction. At the same time, an individual participant data pooled analysis of seven European cohorts

within the ALPHABET consortium, performed by Ling-Wei Chen et al. (2021) in the study *Associations of maternal dietary inflammatory potential and quality with offspring birth outcomes*, showed that a high inflammatory potential of the maternal diet is correlated with lower birth weight and a higher risk of small-for-gestational-age infants. In contrast, a higher-quality, balanced, and anti-inflammatory diet is associated with improved intrauterine development outcomes. These findings indicate that not only the quantitative composition of the diet, but also its qualitative characteristics - particularly diversity and inflammatory potential - are important modifiable determinants of pregnancy course and offspring health [1-2].

Some studies indicate that a pro-inflammatory maternal diet is associated with lower birth weight and poorer growth outcomes in children later in life. The meta-analysis *Dietary Inflammatory Index during pregnancy is associated with birth weight and child anthropometry up to 10 years old* and the study *Maternal Dietary Inflammatory Potential and Offspring Birth Outcomes in a Chinese Population* confirm that the inflammatory potential of the diet is an important factor influencing perinatal outcomes and subsequent child development [3-4].

Purpose of the article. The aim of this study is to summarize current scientific evidence on the characteristics of nutrition during physiological pregnancy, to assess the role of macro- and micronutrients in ensuring normal gestational progression and fetal development, and to identify key directions for optimizing nutritional support for pregnant women from an evidence-based perspective.

Presentation of the main material of the study. The gestational period is characterized by a complex of metabolic, physiological, and hormonal changes that lead to increased nutritional and energy requirements aimed at supporting placental and fetal growth. During this period, adherence to a balanced diet increases the likelihood of full-term pregnancy, reduces the risk of obstetric

complications, and creates favorable conditions for achieving normal birth weight [5–7].

As fetal growth progresses, maternal metabolism also increases, leading to higher nutritional demands. However, in the first trimester, there is no need for additional caloric intake [8]. In contrast, during the second and third trimesters, the basal metabolic rate increases by approximately 390 kcal/day [9]. Accordingly, an additional intake of 360 kcal/day in the second trimester and 475 kcal/day in the third trimester is recommended [10].

Optimal gestational weight gain depends on pre-pregnancy BMI. For underweight women (<18.5), total gain is highest, while it decreases progressively for normal weight, overweight, and obese women. Recommended ranges across trimesters are lower with increasing BMI, serving as guidance for monitoring appropriate weight gain during pregnancy [11].

Analysis of current guidelines indicates that the optimal macronutrient distribution is 15–20% protein, 30–35% fat, and 35–50% carbohydrates [15]. Particular attention should be paid to the increased protein requirements for the synthesis of maternal and fetal structural tissues, which amount to 46 g/day (0.8 g/kg/day) in the first trimester and 71 g/day (1.1 g/kg/day) in the second and third trimesters [12].

In a prospective cohort study led by Hanyue Zhang, the impact of protein intake during pregnancy on the risk of obesity in mothers and their children was investigated. The authors found that not only the quantity but also the source of protein plays an important role in metabolic programming of the offspring. In particular, inadequate or imbalanced protein intake was associated with an increased risk of metabolic disorders, including obesity, in both mothers and their children later in life. The study highlights the importance of high-quality protein intake during pregnancy as a factor influencing long-term health outcomes [13].

In a study conducted by Jiaomei Yang et al., (2025) the association between protein intake and birth weight among pregnant women with low-protein diets was evaluated. It was shown that insufficient protein intake is significantly associated with lower birth weight and an increased risk of small-for-gestational-age infants. The authors concluded that adequate protein intake is critically important for normal fetal growth, particularly in populations at risk of nutritional deficiencies [13].

Fats are not only an important source of energy but also essential components of cell membranes, playing a key role in the development of the fetal nervous and visual systems, particularly polyunsaturated fatty acids such as long-chain omega-3 fatty acids [16]. At the same time, the quality of dietary fats is equally important, including the need to minimize or eliminate trans fats and to reduce saturated fat intake to less than 10% of total energy intake. Adequate intake of omega-3 and omega-6 fatty acids is recommended, including 250 mg/day of eicosapentaenoic acid (EPA) and docosahexaenoic acid (DHA), and 13 g/day of omega-6 fatty acids. Cholesterol intake is recommended to be less than 200 mg/day [17].

Carbohydrates play a central role in maintaining physiological glucose levels in maternal and fetal blood, with a recommended intake of at least 175 g/day. The glycemic index is important: values >70 are associated with rapid absorption, whereas <55 indicates slower metabolism. High-GI foods include white flour, rice, and potatoes, while whole grains, vegetables, legumes, and some fruits have a low GI. Carbohydrates are classified into simple and complex forms, with the latter being preferable due to slower digestion and absorption [19, 20]. Dietary fiber, a type of complex carbohydrate, further supports glycemic control and intestinal function, with a recommended intake of 28 g/day [21, 22].

Folate (the synthetic form is folic acid) is one of the most important cofactors in nucleotide synthesis and DNA methylation. Given the rapid

proliferation of fetal cells, it is critically important for neural tube formation during the first 28 days of pregnancy. Recent literature reviews confirm that normalization of maternal folic acid levels reduces the risk of neural tube defects [23, 24]. Women are recommended to take 0.4–0.8 mg daily starting 1–3 months before conception and continuing throughout pregnancy. Increasing attention is being given to obtaining folate from dietary sources rather than supplements, including dark green leafy vegetables (spinach, broccoli, parsley), legumes (lentils, chickpeas, peas, beans), liver, and citrus fruits (oranges, grapefruit). Authors Anne-Lise Bjørke-Monsen and Per Magne Ueland (2023) also analyze the potential risks of both deficiency and excessive folic acid intake, highlighting the possibility of masking vitamin B_{12} deficiency and other clinical consequences. A significant part of their work focuses on evaluating the effectiveness of food fortification programs with folic acid and their impact on population health outcomes [24].

Particular attention should be paid to iron intake, as it is a key element for oxygen transport (a component of hemoglobin) and fetal organogenesis through erythropoiesis. Iron deficiency anemia in pregnancy is associated with an increased risk of preterm birth, low birth weight, and impaired development of the fetal central nervous system [25]. During gestation, hemoglobin concentration changes due to a 40–50% increase in maternal plasma volume starting at 6–8 weeks and peaking at 32 weeks, leading to hemodilution of erythrocytes [27]. Therefore, screening for iron levels is recommended using a complete blood count at the first prenatal visit and again after 28 weeks of gestation. The total iron requirement during pregnancy reaches 1000–1200 mg [28], and hemoglobin levels below 11 g/dL indicate anemia throughout pregnancy. Due to increased demand, prophylactic supplementation with 30–60 mg of elemental iron orally is recommended, taken in the morning either 1 hour before or 2 hours after meals. Vitamin C intake is considered beneficial to enhance iron absorption [26]. Despite

existing recommendations and numerous clinical observations confirming the effectiveness of iron supplementation in pregnancy, further expansion of the evidence base regarding its routine use remains an актуальне area for future research.

Iodine is a critically important element for the synthesis of thyroid hormones T3 and T4, which regulate cellular growth and basal metabolism and are essential for the development of the embryonic nervous system, as well as neuropsychological development and cognitive function. Due to transplacental transfer and increased renal clearance, iodine requirements increase during pregnancy [29]. However, recent systematic reviews indicate the absence of routine screening for iodine deficiency in pregnant women [30]. At the same time, in regions where iodine deficiency is prevalent, prophylactic supplementation is recommended. A comprehensive review of the literature has shown a positive effect on iodine status with supplementation at a dose of 200 μg/day, although some studies report no significant therapeutic effect [31, 32]. Currently, an individualized approach that takes into account regional factors, dietary habits, and thyroid function is considered the most appropriate.

Vitamin D is a fat-soluble vitamin essential for the regulation of calcium and phosphate levels, which are crucial for bone metabolism and mineralization [32]. Mineral content and bone mineral density are associated with fetal skeletal strength and a reduced risk of perinatal complications and fractures. A review of 23 studies demonstrated that vitamin D supplementation is associated with increased neonatal length [33], while another study identified a relationship between maternal vitamin D intake and increased fetal weight [34]. Additionally, a reduction in the risk of preeclampsia (by 44.8%) has been observed with vitamin D supplementation [35]. The median recommended supplementation dose to meet maternal and fetal needs is 2000–4000 IU/day, as reported by Wen-Chien Yang, Ramaa Chitale, and all. [36]. Therefore, it can be concluded that implementing

screening for 25(OH)D levels in pregnant women and appropriate supplementation is important in current clinical practice.

Choline is an essential micronutrient that plays a key role in phospholipid synthesis (a structural component of cell membranes), acetylcholine production, and methyl group metabolism. During pregnancy, its requirement increases, with its primary role being in neurogenesis, myelination, and the development of cognitive functions in the fetus [37]. In Europe and beyond, choline intake among adults has remained insufficient over the past decade [38]. Randomized cohort studies have demonstrated beneficial effects of choline intake up to 1 g/day during the second half of pregnancy on the child's neurocognitive development. Conversely, inadequate intake of this nutrient has been associated with a higher risk of developmental disorders [37]. The National Academy of Medicine recommends 450 mg/day of choline up to 12 weeks of pregnancy and 550 mg/day thereafter [39, 40]. Rich sources include animal products (eggs, meat, fish), while plant sources contain lower amounts. Current trends favor dietary intake over supplementation.

Conclusions. The obtained data indicate that balanced nutrition is a fundamental component of prenatal care and one of the leading factors in the prevention of obstetric and perinatal complications. Diet quality - including its diversity, adequate energy intake, and sufficient intake of key nutrients - has a direct impact on fetal intrauterine development, the formation of organs and systems, and long-term child health outcomes. At the same time, maternal nutritional status has been shown to be a modifiable factor, the optimization of which can improve the course of pregnancy and perinatal outcomes. A promising direction for future research is the development of individualized approaches to maternal nutrition, taking into account regional, metabolic, and genetic characteristics.

References

1. Tareke, A. A., Melak, E. G., Mengistu, B. K., Hussen, J., & Molla, A. (2024). Association between maternal dietary diversity during pregnancy and birth outcomes: evidence from a systematic review and meta-analysis. *BMC nutrition*, *10*(1), 151. https://doi.org/10.1186/s40795-024-00960-9

2. Chen, L. W., Aubert, A. M., Shivappa, N., Bernard, J. Y., Mensink-Bout, S. M., Geraghty, A. A., … Phillips, C. M. (2021). Associations of maternal dietary inflammatory potential and quality with offspring birth outcomes: An individual participant data pooled analysis of 7 European cohorts in the ALPHABET consortium. *PLoS medicine*, *18*(1), e1003491. https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1003491

3. Souza, M. D. D. C., Ferreira, L. B., & Dos Santos, L. C. (2023). Dietary Inflammatory Index during pregnancy is associated with birth weight and child anthropometry up to 10 years old: A systematic review and meta-analysis. *Nutrition research (New York, N.Y.)*, *114*, 81–97.

4. Zhang, B., Xu, K., Mi, B., Liu, H., Wang, Y., Huo, Y., Ma, L., Liu, D., Jing, H., Liu, J., Cao, S., Dang, S., & Yan, H. (2023). Maternal Dietary Inflammatory Potential and Offspring Birth Outcomes in a Chinese Population. *The Journal of nutrition*, *153*(5), 1512–1523. https://doi.org/10.1016/j.tjnut.2023.03.006

5. Gete, D. G., Waller, M., & Mishra, G. D. (2020). Effects of maternal diets on preterm birth and low birth weight: a systematic review. *The British journal of nutrition*, *123*(4), 446–461. https://doi.org/10.1017/S0007114519002897

6. Tareke, A. A., Melak, E. G., Mengistu, B. K., Hussen, J., & Molla, A. (2024). Association between maternal dietary diversity during pregnancy and birth outcomes: evidence from a systematic review and meta-analysis. *BMC nutrition*, *10*(1), 151. https://doi.org/10.1186/s40795-024-00960-9

7. Salatas, C., Bronnert, A., Lawrence, R., Alexander, T., Wall, C., Bloomfield, F. H., & Lin, L. (2025). Dietary Patterns and Diet Quality before and/or during Pregnancy and How These Affect Birth Outcomes: A Systematic Review and Meta-analysis. *Advances in nutrition (Bethesda, Md.)*, *16*(10), 100490.

8. Xue, L., Chen, X., Sun, J., Fan, M., Qian, H., Li, Y., & Wang, L. (2024). Maternal Dietary Carbohydrate and Pregnancy Outcomes: Quality over Quantity. *Nutrients*, *16*(14), 2269. https://doi.org/10.3390/nu16142269

9. Most, J., Dervis, S., Haman, F., Adamo, K. B., & Redman, L. M. (2019). Energy Intake Requirements in Pregnancy. *Nutrients*, *11*(8), 1812. https://doi.org/10.3390/nu11081812

10. Perumal, N., & Gernand, A. D. (2025). Nutrition during Pregnancy and Birth Outcomes. *Annals of nutrition & metabolism*, *81*(Suppl. 3), 19–32. https://doi.org/10.1159/000541205

11. Surita, F. G. C., Souza, R. T., Carrilho, T. R. B., Hsu, L. P. R., Mattar, R., & Kac, G. (2023). Guidelines on how to monitor gestational weight gain during antenatal care. *Revista brasileira de ginecologia e obstetricia: revista da Federacao Brasileira das Sociedades de Ginecologia e Obstetricia*, *45*(2), 104–108.

12. Murphy, M. M., Higgins, K. A., Bi, X., & Barraj, L. M. (2021). Adequacy and Sources of Protein Intake among Pregnant Women in the United States, NHANES 2003-2012. *Nutrients*, *13*(3), 795. https://doi.org/10.3390/nu13030795

13. Zhang, H., Senior, A. M., Saner, C., Koemel, N. A., Simpson, S. J., Raubenheimer, D., & Heitmann, B. L. (2025). Maternal protein intake during pregnancy and obesity risk in mothers and offspring: a prospective cohort study. *The American journal of clinical nutrition*, *121*(6), 1415–1423. https://doi.org/10.1016/j.ajcnut.2025.04.011

14. Yang, J., Chang, Q., Tian, X., Zhang, B., Zeng, L., Yan, H., Dang, S., & Li, Y. H. (2022). Dietary protein intake during pregnancy and birth weight among Chinese pregnant women with low intake of protein. *Nutrition & metabolism*, *19*(1), 43.

15. Sirico, A., Vastarella, M. G., Ruggiero, E., & Cobellis, L. (2025). Systematic Review of Nutritional Guidelines for the Management of Gestational Diabetes Mellitus: A Global Comparison. *Nutrients*, *17*(14), 2356.

16. Herrera, E., & Ortega-Senovilla, H. (2023). Dietary Implications of Polyunsaturated Fatty Acids during Pregnancy and in Neonates. *Life*, *13*(8), 1656.

17. Patro-Golab, B., Zalewski, B. M., Kammermeier, M., Schwingshackl, L., Koletzko, B., & International Union of Nutritional Sciences (IUNS) Task Force on Dietary Fat Quality (2023). Fat Intake and Fat Quality in Pregnant and Lactating Women, Infants, Children, and Adolescents and Related Health Outcomes: A Scoping Review of Systematic Reviews of Prospective Studies. *Annals of nutrition & metabolism*, *79*(5), 413–422. https://doi.org/10.1159/000533757

18. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine; Health and Medicine Division; Food and Nutrition Board, & Harrison, M. (Eds.). (2020). *Nutrition During Pregnancy and Lactation: Exploring New Evidence: Proceedings of a Workshop*. National Academies Press (US). https://doi.org/10.17226/25841

19. Xue, L., Chen, X., Sun, J., Fan, M., Qian, H., Li, Y., & Wang, L. (2024). Maternal Dietary Carbohydrate and Pregnancy Outcomes: Quality over Quantity. *Nutrients*, *16*(14), 2269. https://doi.org/10.3390/nu16142269

20. Hosseinpour-Niazi, S., Bakhshi, B., Mirmiran, P., Gaeini, Z., Hadaegh, F., & Azizi, F. (2023). Effect of weight change on the association between overall and source of carbohydrate intake and risk of metabolic syndrome: Tehran lipid and glucose study. *Nutrition & metabolism*, *20*(1), 39.

21. Zhang, D. Y., Cheng, D. C., Cao, Y. N., Su, Y., Chen, L., Liu, W. Y., Yu, Y. X., & Xu, X. M. (2022). The effect of dietary fiber supplement on prevention of gestational diabetes mellitus in women with pre-pregnancy overweight/obesity: A randomized controlled trial. *Frontiers in pharmacology*, *13*, 922015. 5

22. Pretorius, R. A., & Palmer, D. J. (2020). High-Fiber Diet during Pregnancy Characterized by More Fruit and Vegetable Consumption. *Nutrients*, *13*(1), 35.

23. Moges, N., Sisay Chanie, E., Anteneh, R. M., Zemene, M. A., Gebeyehu, A. A., Belete, M. A., Kebede, N., … Tsega, S. S. (2024). The effect of folic acid intake on congenital anomalies. A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in pediatrics*, *12*, 1386846. https://doi.org/10.3389/fped.2024.1386846

24. Bjørke-Monsen, A. L., & Ueland, P. M. (2023). Folate - a scoping review for Nordic Nutrition Recommendations 2023. *Food & nutrition research*, *67*, 10.29219/fnr.v67.10258. https://doi.org/10.29219/fnr.v67.10258

25. Hansen, R., Sejer, E. P. F., Holm, C., & Schroll, J. B. (2023). Iron supplements in pregnant women with normal iron status: A systematic review and meta-analysis. *Acta obstetricia et gynecologica Scandinavica*, *102*(9), 1147–1158. https://doi.org/10.1111/aogs.14607

26. Ubom, A. E., Begum, F., Ramasauskaite, D., Nieto-Calvache, A. J., Oguttu, M., Nunes, I., Malel, Z. J., Beyeza-Kashesya, J., Wright, A., & FIGO Committee on Childbirth and Postpartum Hemorrhage (2025). FIGO good practice recommendations on anemia in pregnancy, to reduce the incidence and impact of postpartum hemorrhage (PPH). *International journal of gynaecology and obstetrics: the official organ of the International Federation of Gynaecology and Obstetrics*, *171*(3), 993–1007. https://doi.org/10.1002/ijgo.70529

27. Obianeli, C., Afifi, K., Stanworth, S., & Churchill, D. (2024). Iron Deficiency Anaemia in Pregnancy: A Narrative Review from a Clinical Perspective. *Diagnostics (Basel, Switzerland)*, *14*(20), 2306.

28. Cancado, R. D., Leite, L. A. C., & Muñoz, M. (2025). Defining Global Thresholds for Serum Ferritin: A Challenging Mission in Establishing the Iron Deficiency Diagnosis in This Era of Striving for Health Equity. *Diagnostics*, *15*(3), 289. https://doi.org/10.3390/diagnostics15030289

29. Moreno-Reyes, R., Fuentes Peña, C., Nuñez, J. F., Sánchez, M. B., Carvajal, J. J., Roble, K., Mendoza-León, M. J., Rangel-Ramírez, M. A., & Jara, E. L. (2025). Critical Role of Iodine and Thyroid Hormones During Pregnancy. *International Journal of Molecular Sciences*, *26*(21), 10247.

30. Croce, L., Chiovato, L., Tonacchera, M., Petrosino, E., Tanda, M. L., Moleti, M., Magri, F., Olivieri, A., Pearce, E. N., & Rotondi, M. (2023). Iodine status and supplementation in pregnancy: an overview of the evidence provided by meta-analyses. *Reviews in endocrine & metabolic disorders*, *24*(2), 241–250.

31. Candido, A. C., Azevedo, F. M., Silva, D. L. F., Ribeiro, S. A. V., & Castro Franceschini, S. D. C. (2023). Effects of iodine supplementation on thyroid function parameter: Systematic review and meta-analysis. *Journal of trace elements in medicine and biology: organ of the Society for Minerals and Trace Elements (GMS)*, *80*, 127275. https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2023.127275

32. World Health Organization (2020). WHO antenatal care recommendations for a positive pregnancy experience: nutritional interventions update: vitamin D supplements during pregnancy. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK560395/

33. Luo, T., Lin, Y., Lu, J., Lian, X., Guo, Y., Han, L., & Guo, Y. (2022). Effects of vitamin D supplementation during pregnancy on bone health and offspring growth: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *PloS one*, *17*(10), e0276016. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0276016

34. Maugeri, A., Barchitta, M., Blanco, I., & Agodi, A. (2019). Effects of Vitamin D Supplementation During Pregnancy on Birth Size: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Nutrients*, *11*(2), 442.

35. Moghib, K., Ghanm, T. I., Abunamoos, A., Rajabi, M., Moawad, S. M., Mohsen, A., Kasem, S., Elsayed, K., Sayed, M., Dawoud, A. I., Salomon, I., Elmaghreby, A., Ismail, M., & Amer, A. (2024). Efficacy of vitamin D supplementation on the incidence of preeclampsia: a systematic review and meta-analysis. *BMC pregnancy and childbirth*, *24*(1), 852. https://doi.org/10.1186/s12884-024-07081-y

36. Yang, W. C., Chitale, R., O'Callaghan, K. M., Sudfeld, C. R., & Smith, E. R. (2025). The Effects of Vitamin D Supplementation During Pregnancy on Maternal, Neonatal, and Infant Health: A Systematic Review and Meta-analysis. *Nutrition reviews*, *83*(3), e892–e903. https://doi.org/10.1093/nutrit/nuae065

37. Obeid, R., Derbyshire, E., & Schön, C. (2022). Association between Maternal Choline, Fetal Brain Development, and Child Neurocognition: Systematic Review and Meta-Analysis of Human Studies. *Advances in nutrition (Bethesda, Md.)*, *13*(6), 2445–2457. https://doi.org/10.1093/advances/nmac082

38. Zuk, E., Nikrandt, G., & Chmurzynska, A. (2024). Dietary choline intake in European and non-european populations: current status and future trends-a narrative review. *Nutrition journal*, *23*(1), 68. https://doi.org/10.1186/s12937-024-00970-0

39. Jaiswal, A., Dewani, D., Reddy, L. S., & Patel, A. (2023). Choline Supplementation in Pregnancy: Current Evidence and Implications. *Cureus*, *15*(11), e48538. https://doi.org/10.7759/cureus.48538

40. Korsmo, H. W., Jiang, X., & Caudill, M. A. (2019). Choline: Exploring the Growing Science on Its Benefits for Moms and Babies. *Nutrients*, *11*(8), 1823.

Pecheriaha Svitlana, Candidate of Medical Sciences, assistant Department of Obstetrics, Gynecology and Perinatology, Bukovinian State Medical University, Chernivtsi, Ukraine, https://orcid.org/0000-0003-3884-9109

Balan Anastasiia, student of higher medical education, Bukovinian State Medical University, Chernivtsi, Ukraine

THE MICROBIOME IN THE DEVELOPMENT OF PRETERM BIRTH: MODERN DIAGNOSTIC AND THERAPEUTIC PERSPECTIVES

Abstract

Preterm birth (PTB) remains one of the most pressing problems in modern obstetrics and neonatology, being a leading cause of perinatal morbidity, neonatal mortality, and long-term neurological and metabolic complications in children. Despite significant advances in perinatal medicine, the incidence of PTB in most countries worldwide has not shown a substantial decline, highlighting the need to identify new pathogenetic mechanisms underlying its development. In recent years, increasing attention has been focused on the role of the microbiome in maintaining physiological pregnancy and in the development of obstetric complications.

This review summarizes current scientific data regarding the role of the vaginal, gut, oral, and intra-amniotic microbiome in the pathogenesis of preterm birth. The characteristics of the normal vaginal microbiome during pregnancy, the significance of Lactobacillus spp. dominance, as well as the role of vaginal dysbiosis, anaerobic flora, and microbe-induced inflammation in the premature activation of labor are discussed. Particular attention is paid to the molecular mechanisms involving Toll-like receptor activation, NF-κB signaling pathways, and the production of proinflammatory cytokines, prostaglandins, and matrix

metalloproteinases involved in cervical remodeling, premature rupture of membranes, and stimulation of myometrial contractility.

Current approaches to microbiome diagnostics, including 16S rRNA sequencing, shotgun metagenomics, and metabolomic analysis, are analyzed as promising tools for developing personalized models for PTB risk prediction. Modern strategies for the correction of microbiome disturbances during pregnancy are also reviewed, including the use of probiotics, dietary modification, targeted antimicrobial therapy, and experimental vaginal microbiome transplantation. The перспективність integration of microbiome analysis into prenatal monitoring systems and the need for further large-scale studies to implement personalized preventive strategies into clinical practice are emphasized.

Keywords: preterm birth, microbiome, vaginal dysbiosis, pregnancy, Lactobacillus spp., bacterial vaginosis, probiotics.

Problem Statement. Preterm birth remains one of the leading causes of perinatal morbidity and mortality worldwide. According to the World Health Organization, approximately 15 million preterm infants are born annually, and the rate of preterm birth in most countries ranges from 8% to 12% of all deliveries [1, 2]. Prematurity is associated with a high risk of neonatal mortality, respiratory disorders, central nervous system injury, metabolic disturbances, and long-term disability in children [3]. Despite significant advances in modern obstetrics, the effectiveness of preterm birth prevention remains insufficient, and its incidence has not demonstrated a stable downward trend.

The etiology of preterm birth is multifactorial and includes infectious and inflammatory processes, placentation disorders, cervical insufficiency, multiple pregnancy, as well as genetic and socio-economic factors. However, in a substantial proportion of women, the exact pathogenetic mechanisms underlying spontaneous preterm labor remain unclear [4]. Over the past decade, increasing

attention has been focused on the role of the reproductive tract, gut, and oral microbiome in the development of local and systemic inflammatory responses capable of prematurely activating labor mechanisms. The development of next-generation sequencing (NGS) technologies has enabled detailed characterization of microbial communities and identification of associations between vaginal dysbiosis, reduced dominance of *Lactobacillus spp.*, and an increased risk of preterm birth [5]. Therefore, summarizing current evidence regarding the role of the microbiome in the pathogenesis of preterm birth and evaluating the prospects for novel approaches to prediction, prevention, and therapeutic correction of microbiome disturbances remain highly relevant.

Analysis of recent research and publications. Current studies confirm that the vaginal microbiome plays an essential role in maintaining normal pregnancy. Healthy pregnant women are typically characterized by the dominance of *Lactobacillus spp.*, particularly *L. crispatus*, which maintain a low vaginal pH, produce lactic acid, and inhibit the growth of anaerobic pathogens. Reduced lactobacilli dominance and the formation of CST IV-type vaginal microbiota have been associated with an increased risk of spontaneous preterm birth [6, 7]. Particular attention has been paid to *Gardnerella vaginalis, Sneathia spp., Prevotella spp., Ureaplasma spp.*, and *Mycoplasma hominis*, which are capable of inducing local inflammation and activating Toll-like receptors.

The role of microbe-induced inflammation in the premature activation of labor is widely discussed in the current literature. Activation of NF-κB signaling pathways is accompanied by increased production of IL-1β, IL-6, TNF-α, prostaglandins, and matrix metalloproteinases, contributing to cervical ripening, myometrial contractility, and premature rupture of membranes [14]. Recent studies have also demonstrated the importance of the gut and oral microbiome in the development of systemic inflammatory responses and the possible hematogenous translocation of bacteria to the feto-placental complex [19].

A promising area of current research is the implementation of microbiome technologies into clinical practice. Metagenomic sequencing, shotgun metagenomics, and metabolomic analysis make it possible to identify a "microbiome signature" associated with the risk of preterm birth already during the first and second trimesters of pregnancy [10]. At the same time, considerable attention is being paid to personalized approaches for correcting dysbiosis, including the use of probiotics, dietary modification, targeted antimicrobial therapy, and vaginal microbiome transplantation. However, the results of clinical studies remain heterogeneous, highlighting the need for further large-scale randomized trials.

Purpose of the article. The aim of this study was to summarize current scientific data regarding the role of the microbiome in the pathogenesis of preterm birth, analyze the mechanisms of microbe-induced inflammation, and evaluate promising approaches to early diagnosis, prevention, and therapeutic correction of microbiome disturbances during pregnancy.

Presentation of the main material of the study. During pregnancy, the vaginal microbiome undergoes further stabilization characterized by an increased relative abundance of *L. crispatus* and *L. iners* and reduced microbial diversity, which is considered a protective maternal adaptation [5,7]. Lactobacilli play a key protective role by producing lactic acid, thereby maintaining the vaginal pH at 3.8–4.5, as well as synthesizing bacteriocins and hydrogen peroxide that inhibit the growth of opportunistic microorganisms [8,9].

Importantly, not all lactobacilli exhibit the same protective potential. According to the study by Fettweis J.M. et al. (2019), dominance of *Lactobacillus crispatus* is associated with the lowest risk of preterm birth, whereas predominance of *L. iners* or the formation of CST IV (characterized by reduced lactobacilli content and dominance of anaerobic flora) is associated with an increased risk of spontaneous preterm birth. *L. iners* is considered an unstable

transitional species capable of coexisting with opportunistic anaerobes and contributing to the development of vaginal dysbiosis [5].

The association between vaginal microbiome dysbiosis and preterm birth is supported by extensive epidemiological evidence. Bacterial vaginosis (BV), the most common manifestation of vaginal dysbiosis, is considered one of the most significant independent risk factors for preterm birth. A meta-analysis by Leitich et al., which included more than 20,000 pregnant women, demonstrated that BV approximately doubles the risk of preterm birth [10].

However, conventional clinical diagnostic methods for BV (Amsel criteria and Nugent scoring system) are unable to fully identify microbiome variations associated with an increased risk of preterm birth. Studies using next-generation sequencing (NGS) have shown that some women without clinical signs of BV exhibit subclinical dysbiosis characterized by increased levels of *Gardnerella vaginalis, Prevotella bivia, Sneathia amnionii*, and other anaerobes, which is associated with a similarly elevated risk of preterm birth [11].

An important finding was the identification of a direct correlation between the composition of the cervicovaginal microbiome in early pregnancy and subsequent obstetric outcomes. In the prospective study by Kindinger et al. (2017), women with *L. crispatus* dominance during the first trimester had a significantly lower risk of preterm birth compared with women with an *L. iners*-dominant microbiome or polymicrobial communities ($p<0.001$) [12].

Disruption of the vaginal microbiome and ascending microbial invasion are considered among the key mechanisms underlying spontaneous preterm birth. Vaginal dysbiosis is characterized by a reduction in protective lactobacilli, particularly *Lactobacillus crispatus*, accompanied by excessive colonization by anaerobic microorganisms (*Gardnerella vaginalis, Ureaplasma spp., Mycoplasma hominis, Prevotella spp., Sneathia spp.*). Microorganisms and their structural components are capable of penetrating through the cervical canal into the decidual

tissue, fetal membranes, and amniotic fluid, thereby activating a local immune response. Toll-like receptors (TLRs) of innate immune cells play a crucial role in this process by recognizing pathogen-associated molecular patterns (PAMPs). In particular, lipopolysaccharide from Gram-negative bacteria activates TLR4, bacterial peptidoglycan activates TLR2, and bacterial DNA activates TLR9. Activation of TLRs initiates an intracellular signaling cascade via the adaptor protein MyD88, followed by activation of the transcription factor NF-κB, which regulates the synthesis of proinflammatory mediators [13].

Activation of NF-κB results in increased production of proinflammatory cytokines (IL-1β, IL-6, TNF-α), chemokines, prostaglandins, and matrix metalloproteinases, forming the so-called “inflammatory cascade of labor.” Prostaglandins stimulate myometrial contractility, whereas metalloproteinases promote degradation of cervical and fetal membrane collagen, accelerating cervical ripening and premature rupture of membranes. Simultaneously, infiltration of neutrophils and macrophages into the decidual tissue and chorioamnion contributes to the maintenance of chronic inflammation. Thus, microbe-induced inflammation represents a central pathogenetic mechanism of preterm birth, integrating immune, biochemical, and tissue processes that prematurely activate the physiological program of labor. This process is characterized by multifactorial interactions among microbial, immune, and genetically determined factors [14].

Although amniotic fluid was long considered sterile, the application of molecular genetic techniques, particularly next-generation sequencing (NGS), has enabled the detection of microbial sequences in the amniotic fluid of some women with preterm birth. The presence of intra-amniotic microorganisms is associated with activation of the intrauterine inflammatory response, chorioamnionitis, and adverse neonatal outcomes even in the absence of classical clinical signs of infection [15].

The primary mechanism of intra-amniotic infection is believed to be the ascending spread of microorganisms from the lower genital tract through the cervical canal. However, hematogenous dissemination of bacteria from distant sites, including the oral cavity and gastrointestinal tract, has also been described. Evidence supporting this pathway includes the detection of microorganisms such as *Fusobacterium nucleatum* and *Streptococcus mutans* in amniotic fluid and placental tissues, both of which are traditionally associated with the oral microbiota [16].

Recent evidence suggests the existence of a complex interaction between the maternal gut microbiome and pregnancy outcomes. The gut microbiome modulates systemic levels of inflammatory cytokines and short-chain fatty acids (SCFAs), which influence immune tolerance within the fetoplacental complex. Reduced butyrate production — the primary energy substrate for enterocytes and a potent inhibitor of NF-κB — in cases of intestinal dysbiosis may enhance the maternal systemic inflammatory response and increase myometrial excitability [17].

Notably, in the study by Vinturache et al. (2016), the gut microbiome of women with preterm birth differed significantly from that of women with term pregnancies: a reduced relative abundance of *Akkermansia muciniphila* and *Bifidobacterium spp.* was observed alongside an increased abundance of *Clostridiales* and *Enterobacteriaceae* [18]. These alterations correlated with elevated serum levels of C-reactive protein and IL-6.

Current studies confirm that oral microbiome dysbiosis and periodontitis may be associated with an increased risk of preterm birth through systemic inflammatory responses and the possible translocation of bacteria to the fetoplacental complex. Particular attention has been focused on *Fusobacterium nucleatum*, a member of the oral microbiota associated with chorioamnionitis, premature rupture of membranes, and preterm birth [19]. In addition to direct

bacterial invasion, periodontal pathogens are capable of stimulating the production of proinflammatory cytokines (IL-1β, TNF-α, IL-6) and prostaglandins, which may prematurely activate the mechanisms of labor [20].

At the same time, recent systematic reviews suggest that the relationship between periodontitis and preterm birth is complex and depends on microbiome composition, the severity of systemic inflammation, and the timing of dental intervention. Early microbiome diagnostics and personalized prevention of inflammatory pregnancy complications are currently considered promising approaches [16]. A meta-analysis demonstrated that treatment of periodontitis may be associated with approximately a 15% reduction in the risk of preterm birth (RR 0.85), although the level of evidence was assessed as moderate due to study heterogeneity and the risk of systematic bias. The authors emphasized that the findings are not yet conclusive but support the concept linking oral inflammation, systemic production of proinflammatory cytokines, and activation of the mechanisms underlying preterm labor [21].

Traditional diagnostic methods for vaginal dysbiosis (Amsel criteria and the Nugent scoring system) have limited predictive value for preterm birth because they fail to detect a substantial proportion of uncultivable microorganisms within the vaginal microbiome. The use of 16S rRNA metagenomic sequencing has significantly expanded our understanding of microbial community composition, although this method still has certain limitations, including amplification bias and insufficient assessment of bacterial functional activity [22].

A promising approach is whole-genome shotgun metagenomics, which enables evaluation not only of the taxonomic composition of the microbiome but also of its functional characteristics, including virulence genes, antimicrobial resistance genes, and metabolic activity. Combining these technologies with metabolomic analysis of vaginal secretions makes it possible to identify a

“microbiome signature” associated with the risk of preterm birth already during the first and second trimesters of pregnancy [23].

Among microbiome markers associated with an increased risk of preterm birth, the most significant include reduced dominance of *Lactobacillus crispatus*, increased vaginal microbial diversity with predominance of anaerobic flora, detection of *Sneathia spp.* and *Ureaplasma parvum/urealyticum*, as well as increased bacterial sialidase activity and vaginal pH >4.5 [24].

Lactobacillus-based probiotics remain one of the most promising and safest approaches for correcting vaginal dysbiosis during pregnancy. Recent systematic reviews indicate that the use of vaginal and oral probiotics contributes to restoration of a *Lactobacillus*-dominant microbiome, reduction in the incidence of bacterial vaginosis, and attenuation of local inflammatory responses. However, convincing evidence regarding a significant reduction in the rate of preterm birth is still insufficient due to study heterogeneity and differences in probiotic strains used [25]. Particular interest has been focused on preparations containing *Lactobacillus crispatus, L. rhamnosus* GR-1, and *L. reuteri*, which have demonstrated the ability to stabilize the vaginal microbiome and suppress the growth of anaerobic pathogens.

Another promising strategy is the combined vaginal and oral administration of probiotics aimed at simultaneous correction of both vaginal and gut microbiota and reduction of systemic inflammation. Current studies are also exploring the possibility of personalized selection of probiotic strains according to the vaginal microbiome community state type (CST) and the individual risk of preterm birth [16,20].

Analogous to fecal microbiota transplantation (FMT), which has demonstrated effectiveness in recurrent *Clostridioides difficile* infection, the concept of vaginal microbiota transplantation (VMT) has been actively investigated in recent years. Initial studies demonstrated the possibility of partial

restoration of a *Lactobacillus*-dominant vaginal microbiome following transfer of vaginal secretions from healthy donors. Particular interest has been generated by the studies of Dominguez-Bello et al. on “vaginal seeding” in newborns delivered by cesarean section, which confirmed the possibility of modifying early microbial colonization [26, 27]. Currently, vaginal microbiota transplantation is considered an experimental approach for the correction of persistent vaginal dysbiosis, and clinical studies evaluating its safety and efficacy are ongoing.

Traditional treatment of bacterial vaginosis with metronidazole or clindamycin is associated with a high recurrence rate, which is related to the nonspecific effects of antibiotics on the vaginal microbiome and insufficient restoration of *Lactobacillus*-dominant flora. Modern approaches involve personalized correction of vaginal dysbiosis based on the individual microbiome profile, including targeted antimicrobial therapy followed by restoration of lactobacillary flora using probiotics. A promising strategy is the use of dequalinium chloride, which demonstrates antimicrobial activity against anaerobic pathogens while exerting a relatively lower impact on *Lactobacillus spp.* [28].

Maternal nutrition during pregnancy significantly influences the composition of the gut microbiome and indirectly affects the vaginal microbiome. The Mediterranean diet, rich in fiber, polyphenols, and omega-3 fatty acids, is associated with increased production of short-chain fatty acids, particularly butyrate, and reduced systemic inflammatory responses. Recent cohort studies indicate that greater adherence to a Mediterranean dietary pattern during pregnancy is associated with a lower risk of preterm birth and improved perinatal outcomes [29].

Conclusions. Current evidence suggests that the microbiome is an important factor in the regulation of pregnancy and the pathogenesis of preterm birth. Alterations in the vaginal, gut, and oral microbiome are associated with activation of local and systemic inflammatory responses, increased production of

proinflammatory cytokines, and premature activation of labor mechanisms. The most unfavorable conditions are characterized by reduced dominance of *Lactobacillus crispatus* and predominance of anaerobic flora (*Gardnerella, Sneathia, Prevotella, Ureaplasma*).

The use of modern molecular genetic technologies, including 16S rRNA sequencing, shotgun metagenomics, and metabolomic analysis, has significantly expanded our understanding of the role of the microbiome in the development of preterm birth and created the basis for personalized approaches to prediction and prevention. Promising directions include early microbiome diagnostics, individualized correction of vaginal dysbiosis, probiotic therapy, and further investigation of vaginal microbiota transplantation. However, further large-scale studies are required for the implementation of microbiome technologies into routine obstetric practice.

References

1. WHO. Born Too Soon: Decade of Action on Preterm Birth. Geneva: World Health Organization; 2023. Available at: https://www.who.int/publications/i/item/9789240073890

2. Purisch, S. E., & Gyamfi-Bannerman, C. (2017). Epidemiology of preterm birth. *Seminars in perinatology*, *41*(7), 387–391. https://doi.org/10.1053/j.semperi.2017.07.009

3. Blencowe, H., Cousens, S., Chou, D., Oestergaard, M., Say, L., Moller, A. B., Kinney, M., Lawn, J., & Born Too Soon Preterm Birth Action Group (2013). Born too soon: the global epidemiology of 15 million preterm births. *Reproductive health*, *10 Suppl 1*(Suppl 1), S2. https://doi.org/10.1186/1742-4755-10-S1-S2

4. Dunlop, A. L., Satten, G. A., Hu, Y. J., Knight, A. K., … Corwin, E. J. (2021). Vaginal Microbiome Composition in Early Pregnancy and Risk of

Spontaneous Preterm and Early Term Birth Among African American Women. Frontiers in cellular and infection microbiology, 11, 641005. https://doi.org/10.3389/fcimb.2021.641005

5. Fettweis, J. M., Serrano, M. G., Brooks, J. P., Edwards, D. J., Girerd, P. H., Parikh, H. I., Huang, B., Arodz, T. J., … Buck, G. A. (2019). The vaginal microbiome and preterm birth. *Nature medicine*, *25*(6), 1012–1021. https://doi.org/10.1038/s41591-019-0450-2

6. Ravel, J., Gajer, P., Abdo, Z., Schneider, G. M., Koenig, S. S., McCulle, S. L., Karlebach, S., … Forney, L. J. (2011). Vaginal microbiome of reproductive-age women. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *108 Suppl 1*(Suppl 1), 4680–4687. https://doi.org/10.1073/pnas.1002611107

7. Bayar, E., Bennett, P. R., Chan, D., Sykes, L., & MacIntyre, D. A. (2020). The pregnancy microbiome and preterm birth. *Seminars in immunopathology*, *42*(4), 487–499. https://doi.org/10.1007/s00281-020-00817-w

8. Witkin, S. S., & Linhares, I. M. (2017). Why do lactobacilli dominate the human vaginal microbiota? *BJOG: an international journal of obstetrics and gynaecology*, *124*(4), 606–611. https://doi.org/10.1111/1471-0528.14390

9. Pillay, N., Short, C. S., Mzobe, G. F., Mtshali, A., & Ngcapu, S. (2026). The vaginal microbiome in pregnancy and preterm birth: mechanisms, disparities, and therapeutic opportunities. *NPJ biofilms and microbiomes*, *12*(1), 89. https://doi.org/10.1038/s41522-026-00945-5

10. Leitich, H., Bodner-Adler, B., Brunbauer, M., Kaider, A., Egarter, C., & Husslein, P. (2003). Bacterial vaginosis as a risk factor for preterm delivery: a meta-analysis. *American journal of obstetrics and gynecology*, *189*(1), 139–147. https://doi.org/10.1067/mob.2003.339

11. Brown, R. G., Marchesi, J. R., Lee, Y. S., Smith, A., Lehne, … MacIntyre, D. A. (2018). Vaginal dysbiosis increases risk of preterm fetal membrane

rupture, neonatal sepsis and is exacerbated by erythromycin. *BMC medicine*, *16*(1), 9. https://doi.org/10.1186/s12916-017-0999-x

12. Kindinger, L. M., Bennett, P. R., Lee, Y. S., Marchesi, J. R., Smith, A., Cacciatore, S., Holmes, E., Nicholson, J. K., Teoh, T. G., & MacIntyre, D. A. (2017). The interaction between vaginal microbiota, cervical length, and vaginal progesterone treatment for preterm birth risk. *Microbiome*, *5*(1), 6. https://doi.org/10.1186/s40168-016-0223-9

13. Romero, R., Dey, S. K., & Fisher, S. J. (2014). Preterm labor: one syndrome, many causes. *Science (New York, N.Y.)*, *345*(6198), 760–765. https://doi.org/10.1126/science.1251816

14. Menon, R., Richardson, L. S., & Lappas, M. (2019). Fetal membrane architecture, aging and inflammation in pregnancy and parturition. *Placenta*, *79*, 40–45. https://doi.org/10.1016/j.placenta.2018.11.003

15. Gilman-Sachs, A., Dambaeva, S., Salazar Garcia, M. D., Hussein, Y., Kwak-Kim, J., & Beaman, K. (2018). Inflammation induced preterm labor and birth. *Journal of reproductive immunology*, *129*, 53–58. https://doi.org/10.1016/j.jri.2018.06.029

16. Powell, A. M., Khan, F. Z. A., Ravel, J., & Elovitz, M. A. (2024). Untangling Associations of Microbiomes of Pregnancy and Preterm Birth. *Clinics in perinatology*, *51*(2), 425–439. https://doi.org/10.1016/j.clp.2024.02.009

17. Kimura, I., Miyamoto, J., Ohue-Kitano, R., Watanabe, K., Yamada, T., Onuki, M., Aoki, R., Isobe, … Hase, K. (2020). Maternal gut microbiota in pregnancy influences offspring metabolic phenotype in mice. *Science (New York, N.Y.)*, *367*(6481), eaaw8429. https://doi.org/10.1126/science.aaw8429

18. Vinturache, A. E., Gyamfi-Bannerman, C., Hwang, J., Mysorekar, I. U., Jacobsson, B., & Preterm Birth International Collaborative (PREBIC) (2016). Maternal microbiome - A pathway to preterm birth. *Seminars in fetal & neonatal medicine*, *21*(2), 94–99. https://doi.org/10.1016/j.siny.2016.02.004

19. García-Rios, P., Rodríguez-Lozano, F. J., González-Murcia, R., Murcia, L., Victoria-Montesinos, D., & García-Muñoz, A. M. (2026). The role of oral dysbiosis in pregnancy complications: a systematic review and meta-analysis of preterm birth. *Journal of oral microbiology*, *18*(1), 2617757. https://doi.org/10.1080/20002297.2026.2617757

20. Xie, Z., Chen, Z., & Ma, G. (2025). Dynamic changes in the pregnancy microbiome and their role in preterm birth. *Frontiers in cellular and infection microbiology*, *15*, 1683610. https://doi.org/10.3389/fcimb.2025.1683610

21. Thomas, C., Ahmed, S., Berghella, V., Brignardello-Petersen, R., El-Rabbany, M., Devion, C., & Ronzoni, S. (2026). Effect of dental treatments on reduction of preterm birth: a systematic review and meta-analysis. *American journal of obstetrics & gynecology MFM*, *8*(3), 101884. https://doi.org/10.1016/j.ajogmf.2025.101884

22. Goodrich, J. K., Waters, J. L., Poole, A. C., Sutter, J. L., Koren, O., Blekhman, R., Beaumont, M., … Ley, R. E. (2014). Human genetics shape the gut microbiome. *Cell*, *159*(4), 789–799. https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.09.053

23. Stafford, G. P., Parker, J. L., Amabebe, E., Kistler, J., Reynolds, S., Stern, V., Paley, M., & Anumba, D. O. C. (2017). Spontaneous Preterm Birth Is Associated with Differential Expression of Vaginal Metabolites by Lactobacilli-Dominated Microflora. *Frontiers in physiology*, *8*, 615. https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00615

24. Donders, G., Bellen, G., Janssens, D., Van Bulck, B., Hinoul, P., & Verguts, J. (2017). Influence of contraceptive choice on vaginal bacterial and fungal microflora. *European journal of clinical microbiology & infectious diseases: official publication of the European Society of Clinical Microbiology*, *36*(1), 43–48. https://doi.org/10.1007/s10096-016-2768-8

25. Jarde, A., Lewis-Mikhael, A. M., Moayyedi, P., Stearns, J. C., Collins, S. M., Beyene, J., & McDonald, S. D. (2018). Pregnancy outcomes in women

taking probiotics or prebiotics: a systematic review and meta-analysis. *BMC pregnancy and childbirth*, *18*(1), 14. https://doi.org/10.1186/s12884-017-1629-5

26. Lev-Sagie, A., Goldman-Wohl, D., Cohen, Y., Dori-Bachash, M., Leshem, A., Mor, U., Strahilevitz, J., Moses, A. E., Shapiro, H., Yagel, S., & Elinav, E. (2019). Vaginal microbiome transplantation in women with intractable bacterial vaginosis. *Nature medicine*, *25*(10), 1500–1504. https://doi.org/10.1038/s41591-019-0600-6

27. Dominguez-Bello, M. G., De Jesus-Laboy, K. M., Shen, N., Cox, L. M., Amir, A., Gonzalez, A., … Clemente, J. C. (2016). Partial restoration of the microbiota of cesarean-born infants via vaginal microbial transfer. *Nature medicine*, *22*(3), 250–253. https://doi.org/10.1038/nm.4039

28. Muzny, C. A., & Sobel, J. D. (2022). The Role of Antimicrobial Resistance in Refractory and Recurrent Bacterial Vaginosis and Current Recommendations for Treatment. *Antibiotics (Basel, Switzerland)*, *11*(4), 500. https://doi.org/10.3390/antibiotics11040500

29. Tareke, A. A., Melak, E. G., Mengistu, B. K., Hussen, J., & Molla, A. (2024). Association between maternal dietary diversity during pregnancy and birth outcomes: evidence from a systematic review and meta-analysis. *BMC nutrition*, *10*(1), 151. https://doi.org/10.1186/s40795-024-00960-9

Андрусяк Марк Володимирович, директор департаменту кадрової політики Міністерства оборони України, полковник, https://orcid.org/0009-0001-7708-0323

Andrusiak Mark, director of the Personnel Policy Department of the Ministry of Defense of Ukraine, Colonel

МЕХАНІЗМИ ДЕРЖАВНОГО УПРАВЛІННЯ РОЗВИТКОМ КАДРОВОГО ПОТЕНЦІАЛУ СЕКТОРУ БЕЗПЕКИ І ОБОРОНИ В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ: ТРАНСФОРМАЦІЯ ТА ІНТЕГРАЦІЯ СТАНДАРТІВ НАТО

MECHANISMS OF PUBLIC ADMINISTRATION FOR THE DEVELOPMENT OF HUMAN RESOURCES POTENTIAL IN THE SECURITY AND DEFENSE SECTOR UNDER DIGITALIZATION: TRANSFORMATION AND INTEGRATION OF NATO STANDARDS

Анотація

У статті комплексно досліджено механізми державного управління розвитком кадрового потенціалу сектору безпеки і оборони України (далі – МДУ КП) в умовах цифровізації та євроатлантичної інтеграції. Встановлено, що ефективність цих механізмів визначається не окремими інструментами, а ступенем інтеграції цифрових платформ, компетентнісного підходу та стандартів НАТО в єдину управлінську систему. Виявлено системний дисбаланс: мотивація персоналу, оцінювання результативності та кар'єрне просування функціонують як автономні елементи, що знижує прогнозованість кадрових рішень. Доведено, що цифровізація виступає не допоміжним засобом, а базовою умовою трансформації МДУ КП, а

інтеграція стандартів НАТО (STANAG 2116, система професійної військової освіти, компетентнісне управління) – стратегічним орієнтиром. Запропоновано концептуальну модель модернізації, що поєднує створення єдиної цифрової платформи кадрового менеджменту, впровадження аналітики персоналу на основі Big Data та психофізіологічних комплексів оцінювання, а також інституціоналізацію кадрового резерву як інструменту довгострокового планування.

Ключові слова: механізми державного управління, кадровий потенціал, сектор безпеки і оборони, цифровізація, стандарти НАТО, управління кар'єрою.

Abstract

The article comprehensively examines the mechanisms of public administration for the development of human resources potential in the security and defense sector of Ukraine (hereinafter – MPA HRP) under conditions of digitalization and Euro-Atlantic integration. It is established that the effectiveness of these mechanisms is determined not by individual tools, but by the degree of integration of digital platforms, competency-based approach, and NATO standards into a unified management system. A systemic imbalance is identified: personnel motivation, performance evaluation, and career advancement function as autonomous elements, which reduces the predictability of personnel decisions. It is proven that digitalization serves not as an auxiliary tool but as a fundamental condition for the transformation of MPA HRP, while the integration of NATO standards (STANAG 2116, professional military education system, competency-based management) acts as a strategic benchmark. A conceptual modernization model is proposed, combining the creation of a unified digital personnel management platform, the implementation of Big Data-based personnel analytics

and psychophysiological assessment complexes, as well as the institutionalization of the personnel reserve as a long-term planning tool.

Keywords: mechanisms of public administration, human resources potential, security and defense sector, digitalization, NATO standards, career management.

Постановка проблеми

Сучасний стан розвитку сектору безпеки і оборони України характеризується накладанням трьох взаємопов'язаних викликів: триваючої повномасштабної збройної агресії, стратегічного курсу на євроатлантичну інтеграцію та необхідності цифрової трансформації всіх сфер державного управління. У цьому контексті механізми державного управління розвитком кадрового потенціалу сектору безпеки і оборони (МДУ КП) набувають критичного значення, оскільки саме якість людського ресурсу визначає спроможність сил оборони виконувати покладені завдання.

Водночас чинна система характеризується глибинним дисбалансом. Як засвідчують результати науково-дослідних робіт Науково-методичного центру кадрової політики Міністерства оборони України (2016–2021 рр.), фрагментарність кадрового управління проявляється у розриві між стратегічним плануванням потреб у персоналі та реальними механізмами добору, оцінювання й кар'єрного просування. Мотивація, оцінювання результативності та управління кар'єрою функціонують як автономні контури, що не утворюють єдиного кадрового циклу. Це призводить до того, що навіть концептуально обґрунтовані рішення залишаються декларативними, а кадровий потенціал використовується неоптимально.

Проблема посилюється відсутністю системної інтеграції цифрових інструментів у повсякденну кадрову практику, а також повільними темпами адаптації стандартів НАТО у сфері управління персоналом. Тому метою

статті є обґрунтування концептуальних засад трансформації МДУ КП через поєднання цифровізації, інновацій та інтеграції стандартів НАТО.

Аналіз літературних джерел

Теоретичне підґрунтя дослідження МДУ КП формується на перетині інституціональної теорії (Д. Норт, В. Скотт), концепції безпекового управління (Е. Краманн) та теорії військово-професійної соціалізації (С. Гантінгтон, П. Фівер). У вітчизняному дискурсі вагомий внесок зробили В. Сокуренко, В. Гурковський, Є. Романенко, О. Акімов, Ю. Клят, які досліджували професіоналізацію персоналу, компетентнісний підхід та стандартизацію кадрових процесів.

Особливе значення мають науково-дослідні роботи НМЦ КП МОУ (2016–2021), зокрема: «Дослідження ефективності підготовки та прийняття кадрових рішень на підставі застосування вимог до кандидатів на посади військовослужбовців» (2018), «Обґрунтування доцільних шляхів підвищення ефективності функціонування системи управління кар'єрою» (2019), «Обґрунтування порядку формування та використання Резерву кандидатів для просування по службі» (2021). У цих працях зафіксовано ключову суперечність: наявність розвиненої нормативної бази поряд із фрагментарністю її практичної реалізації.

Водночас питання інтеграції цифрових технологій у МДУ КП та їх поєднання зі стандартами НАТО залишаються недостатньо дослідженими. Зарубіжні напрацювання (Дж. Марлер, Дж. Будро – e-HRM; С. Фалетта, В. Комбз – data-driven HRM) створюють методологічну рамку, але потребують адаптації до специфіки українського сектору безпеки і оборони.

Виклад результатів дослідження

Ефективність механізмів державного управління розвитком кадрового потенціалу сектору безпеки і оборони (МДУ КП) не зводиться до сукупності адміністративних процедур — вона визначається глибинним ступенем

інституційної узгодженості між нормативним, організаційним та операційним рівнями. Нормативний рівень охоплює стратегічні документи (Стратегія національної безпеки, Стратегія воєнної безпеки, Концепція військової кадрової політики до 2028 року) та законодавчі акти (Закони України «Про національну безпеку України», «Про оборону України», «Про військовий обов'язок і військову службу»). Організаційний рівень представлений структурами, що реалізують кадрову політику: Міністерство оборони України, Департамент кадрової політики МОУ, Генеральний штаб ЗСУ, кадрові органи військових частин. Операційний рівень — це безпосередні процедури добору, підготовки, оцінювання, ротації та просування персоналу.

Застосування підходу security governance (управління безпекою) дозволяє розглядати кадровий потенціал не як статичний ресурс, а як динамічну систему, що потребує безперервного відтворення через замкнений цикл: планування потреб у персоналі → добір кандидатів → професійна підготовка → оцінювання результативності → кар'єрне просування → повторне планування з урахуванням зворотного зв'язку. Саме цей цикл нині є розірваним, що підтверджується результатами науково-дослідних робіт НМЦ КП МОУ (2018–2021). Результати оцінювання слабко корелюють із мотиваційними механізмами та рішеннями про кар'єрне зростання, а кадровий резерв у багатьох випадках існує формально, не виконуючи функції інструменту довгострокового планування.

Аналіз практики кадрового забезпечення у Збройних Силах України, проведений на основі узагальнення даних НДР 2018–2021 років, а також матеріалів емпіричних досліджень автора (анкетування респондентів у структурі Департаменту кадрової політики МОУ, n=64–120 за різними напрямами), виявляє три ключові зони системного дисбалансу.

Перша зона — мотиваційні механізми. Вони зосереджені переважно на матеріальних стимулах (грошове забезпечення, надбавки, пільги), тоді як професійна та кар'єрна мотивація залишаються недостатньо розвиненими. Понад 60% опитаних респондентів вказали, що можливості професійного розвитку та кар'єрного зростання не мають вирішального впливу на їхню службову залученість. Це свідчить про домінування екстринсивної (зовнішньої) мотивації над інтринсивною (внутрішньою), що в довгостроковій перспективі знижує стійкість кадрової системи.

Друга зона — оцінювання результативності. Процедури оцінювання переважно формалізовані, орієнтовані на констатацію виконання/невиконання посадових обов'язків, але не виконують функції зворотного зв'язку для професійного розвитку. Лише 27–29% респондентів (залежно від дослідження) підтвердили, що результати оцінювання мають визначальний вплив на формування кадрового резерву або рішення про просування. У 52–62% випадків оцінювання не виконує інтегруючої функції в єдиному кадровому циклі, що призводить до втрати аналітичної цінності накопичених даних.

Третя зона — управління кар'єрою. Цей елемент має найкраще наукове підґрунтя (НДР 2019 р. «Обґрунтування доцільних шляхів підвищення ефективності функціонування системи управління кар'єрою військовослужбовців Збройних Сил України» містить розгорнуті моделі кар'єрного планування). Однак у практичній площині управління кар'єрою залишається неінтегрованим з мотивацією та оцінюванням. Кар'єрне просування нерідко базується на вислузі років або суб'єктивних рішеннях, а не на прозорих критеріях результативності та компетентностей.

Наслідком цього системного дисбалансу є низька прогнозованість кадрових рішень. Відсутність чіткого зв'язку між якістю службової діяльності, стимулюванням та кар'єрним зростанням породжує недовіру до

кадрової системи, знижує мотивацію до професійного вдосконалення та створює ризики втрати висококваліфікованих кадрів.

Подолання розриву між окремими елементами МДУ КП можливе лише через створення єдиного цифрового середовища, яке фізично та логічно інтегрує розрізнені процеси. Цифровізація тут виступає не як додатковий інструмент оптимізації, а як базова умова, що змінює саму логіку управління — від реактивної (реагування на поточні потреби) до проактивної (прогнозування та планування).

Запропонована автором цифрова платформа «Defense HR Portal» («Кадри оборони») має забезпечити чотири ключові функції.

По-перше, централізований облік даних про персонал, що включає не лише формальні характеристики (посада, звання, стаж), а й якісні параметри: рівень професійної кваліфікації, набуті компетентності, досвід участі в бойових діях, результати періодичних оцінювань, дані про проходження курсів підвищення кваліфікації та професійної військової освіти (PME).

По-друге, автоматизоване співставлення вимог до посад і компетентностей кандидатів. Це дозволяє перейти від практики «призначення за знайомством» або «за наявністю вільної посади» до об’єктивного підбору на основі цифрового профілю військовослужбовця. Платформа може генерувати рекомендації щодо найбільш відповідних кандидатів на вакантні посади, враховуючи не лише формальну кваліфікацію, а й прогнозований потенціал розвитку.

По-третє, прозору систему кар’єрного планування з доступом до інформації про наявні вакансії, критерії відбору, терміни ротації та вимоги до кандидатів. Це забезпечує реалізацію принципу меритократії — кожен військовослужбовець має змогу бачити кар’єрні перспективи та свідомо планувати власний професійний розвиток.

По-четверте, аналітичний модуль для прогнозування кадрових потреб. На основі накопичених даних про плинність, вікову структуру, рівень кваліфікації, виконання освітніх програм та інші параметри система може будувати прогнози щодо майбутнього дефіциту за окремими спеціальностями або рівнями управління, що дозволяє своєчасно коригувати програми підготовки та добору.

Реалізація цифрової платформи автоматично створює передумови для інтеграції: результати оцінювання стають доступними для кадрових органів, що приймають рішення про просування; формування резерву спирається на об'єктивні дані, а не на суб'єктивні оцінки окремих командирів; мотиваційні механізми набувають прозорості, оскільки критерії заохочення та преміювання можуть бути прив'язані до досягнутих результатів, зафіксованих у системі. Цифровізація, таким чином, виступає каталізатором системної інтеграції, а не просто технічним оновленням.

Перехід до компетентнісної моделі, закріпленої у стандартах НАТО, дозволяє не лише формально адаптувати нормативну базу, а й змінити управлінську парадигму. Три стандарти мають тут визначальне значення.

STANAG 2116 (NATO Codes for Grades of Military Personnel) забезпечує уніфікацію військових звань та посад, створюючи передумови для порівнянності кадрових структур України та держав-членів Альянсу. Імплементація цього стандарту дозволяє автоматизовано співставляти посади різних рівнів, що є необхідною умовою для участі в багатонаціональних операціях та обміну персоналом.

Система професійної військової освіти (PME), визначена документами MC 0458/3 та AJP-7, розглядає освіту як безперервний процес, інтегрований у кар'єрне планування. Це означає, що проходження певних рівнів PME є не просто формальною вимогою, а обов'язковою передумовою для зайняття

вищих посад. Цифрова платформа має автоматизовано відстежувати виконання цих вимог.

Підходи до управління сержантським складом (NCO) передбачають формування сержантського корпусу як окремої управлінської ланки, відповідальної за підготовку, дисципліну та повсякденне функціонування підрозділів. Це потребує створення окремих кар'єрних траєкторій, системи професійної підготовки та критеріїв оцінювання для сержантського складу.

Ключовим є те, що інтеграція цих стандартів має відбуватися одночасно з цифровізацією, а не послідовно. Без цифрової платформи стандарти залишаються декларативними — неможливо автоматизовано відстежувати виконання вимог PME, співставляти коди STANAG 2116 або вести об'єктивний облік компетентностей сержантського складу. Цифрова платформа, своєю чергою, стає інструментом імплементації компетентнісного підходу, автоматизованого відстеження виконання вимог PME та прозорого кар'єрного просування за принципом меритократії.

Впровадження аналітики великих даних (Big Data) дозволяє перейти від інтуїтивних рішень до прогнозування кадрових ризиків — плинності, професійного вигорання, невідповідності кваліфікації посадовим вимогам. Аналітичний модуль платформи може виявляти приховані закономірності: наприклад, зв'язок між певними типами бойового досвіду та успішністю виконання управлінських функцій, або між частотою ротацій та рівнем лояльності персоналу.

Використання психофізіологічних комплексів оцінювання на етапах добору та ротації підвищує об'єктивність визначення придатності до служби в екстремальних умовах. Запропонований комплекс «Military Psychophysiological Assessment Complex» (MPAC) має включати сенсорні пристрої для вимірювання психоемоційного стану, програмне забезпечення для обробки даних та аналітичні модулі для формування висновків. Це

особливо актуально для посад, пов'язаних з прийняттям рішень в умовах високого стресу.

Водночас застосування штучного інтелекту (AI-рекрутинг) має бути обмежене первинним відбором з обов'язковим контролем людини («human-in-the-loop»). Пропонована система «AI Military Recruitment System» (AIMRS) може здійснювати автоматизований аналіз анкетних даних, професійних навичок та формальних критеріїв, однак остаточне рішення про допуск до подальших етапів відбору ухвалює уповноважена посадова особа. Такий підхід відповідає вимогам етики, безпеки та запобігає дискримінаційним ризикам, пов'язаним із «чорним ящиком» алгоритмів.

Узагальнення результатів дозволяє запропонувати концептуальну модель, у межах якої цифровізація, інновації та стандарти НАТО не є окремими напрямами, а утворюють єдиний взаємопов'язаний комплекс. Цифрова платформа є технологічною основою, що забезпечує збір, зберігання, обробку та аналіз кадрових даних. Компетентнісний підхід та система PME — змістовним наповненням, яке визначає, які саме дані мають збиратися та як вони інтерпретуються. Прозорі процедури кар'єрного просування та оцінювання — механізмом реалізації, що перетворює накопичену інформацію на конкретні управлінські рішення.

Лише за такої умови кадровий резерв перестає бути формальним списком і стає інструментом довгострокового стратегічного планування. Мотивація персоналу — похідною від об'єктивних результатів служби, зафіксованих у цифровому профілі, а не від суб'єктивних оцінок. Управління кар'єрою — безперервним процесом, інтегрованим з оцінюванням та професійним розвитком.

Така модель не лише підвищує ефективність використання наявного кадрового потенціалу, але й створює передумови для інституційної стійкості сектору безпеки і оборони в умовах довготривалих безпекових викликів.

Подальша імплементація моделі потребує розробки технічних специфікацій цифрової платформи, адаптованих до вимог інформаційної безпеки, а також нормативного закріплення нових процедур у відомчих актах Міністерства оборони України.

Висновки

Система МДУ КП в Україні характеризується фрагментарністю: мотивація, оцінювання результативності та управління кар'єрою не утворюють єдиного кадрового циклу, що знижує прогнозованість кадрових рішень та ефективність використання кадрового потенціалу.

Цифровізація виступає не допоміжним інструментом, а базовою умовою трансформації МДУ КП, оскільки лише єдина цифрова платформа здатна інтегрувати розрізнені елементи (облік, оцінювання, планування) в аналітично-прогностичну систему.

Інтеграція стандартів НАТО (STANAG 2116, PME, компетентнісне управління) має здійснюватися одночасно з цифровізацією, оскільки цифрове середовище є необхідною умовою практичної імплементації цих стандартів (автоматизоване співставлення рангів, відстеження виконання освітніх програм, прозоре кар'єрне просування).

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку конкретних технічних рішень цифрової платформи, адаптованих до вимог інформаційної безпеки, а також на емпіричну верифікацію запропонованої моделі в умовах реального функціонування кадрових органів сектору безпеки і оборони.

Література

1. Сокуренко В. Кадрова політика в оборонному секторі: поняття, зміст і основні напрями реалізації. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: Юридичні науки*. 2015. Вип. 5. Т. 3. С. 63–66.

2. Гурковський В., Романенко Є., Андрусяк М., Русецький Р. Кадрова політика у Збройних силах України: концепція управління інтелектуальним потенціалом. *Military Strategy and Technology*. 2025. Vol. 3 (3). С. 39–49.

3. Клят Ю., Семененко О., Андрусяк М. та ін. Глосарій кадрового менеджменту та мобілізаційної роботи у Збройних Силах України. Київ: Ліра-К, 2025. 258 с.

4. НДР Міністерства оборони України (НМЦ КП МОУ). Дослідження ефективності підготовки та прийняття кадрових рішень на підставі застосування вимог до кандидатів на посади військовослужбовців Збройних Сил України. Київ, 2018. 213 с.

5. НДР Міністерства оборони України (НМЦ КП МОУ). Обґрунтування доцільних шляхів підвищення ефективності функціонування системи управління кар'єрою військовослужбовців Збройних Сил України. Київ, 2019. 227 с.

6. НДР Міністерства оборони України (НМЦ КП МОУ). Обґрунтування порядку формування та використання Резерву кандидатів для просування по службі в умовах впровадження управління кар'єрою військовослужбовців за військовими званнями. Київ, 2021. 100 с.

7. North D. C. Institutions, Institutional Change and Economic Performance. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 152 p.

8. Scott W. R. Institutions and Organizations: Ideas, Interests, and Identities. 4th ed. Los Angeles: SAGE Publications, 2014. 360 p.

9. Krahmann E. Conceptualizing Security Governance. *Cooperation and Conflict*. 2003. Vol. 38, No. 1. P. 5–26.

10. Huntington S. P. The Soldier and the State: The Theory and Politics of Civil-Military Relations. Cambridge: Harvard University Press, 1957. 534 p.

11. Feaver P. D. Armed Servants: Agency, Oversight, and Civil-Military Relations. Cambridge: Harvard University Press, 2003. 352 p.

12. Marler J. H., Boudreau J. W. An evidence-based review of HR analytics. *International Journal of Human Resource Management*. 2021. Vol. 32, No. 1. P. 1–36.

13. Falletta S., Combs W. The HR analytics cycle: a seven-step process for building evidence-based HR. *Journal of Organizational Effectiveness*. 2021. Vol. 8, No. 2. P. 157–175.

14. NATO Standardization Office. STANAG 2116: NATO Codes for Grades of Military Personnel. Brussels: NATO, 2021. 34 p.

15. NATO. Allied Joint Doctrine for Education and Training (AJP-7). Brussels: NATO Standardization Office, 2016. 200 p.

16. Akimov O., Akimova L. Competency-based approach to building human resources for public administration in the security and defence sector. *Democratic Governance*. 2025. Vol. 18, No. 1. P. 18–27.

17. Золотов А. Компетентісна модель управління персоналом у Збройних силах: теоретичне обґрунтування та практичні аспекти. *Національні інтереси України*. 2025. № 11 (16). С. 228–248.

References

1. Sokurenko, V. (2015). Kadrova polityka v oboronomu sektori: poniattia, zmist i osnovni napriamy realizatsii. *Naukovyi visnyk Khersonskoho derzhavnoho universytetu. Seriia: Yurydychni nauky*, 5(3), 63–66.

2. Hurkovskyi, V., Romanenko, Ye., Andrusiak, M., Rusetskyi, R. (2025). Kadrova polityka u Zbroinykh sylakh Ukrainy: kontseptsiia upravlinnia intelektualnym potentsialom. *Military Strategy and Technology*, 3(3), 39–49.

3. Kliat, Yu., Semenenko, O., Andrusiak, M. et al. (2025). *Glosarii kadrovoho menedzhmentu ta mobilizatsiinoi roboty u Zbroinykh Sylakh Ukrainy*. Kyiv: Lira-K.

4. Research work of the Ministry of Defence of Ukraine (SMC PD MOD). (2018). *Study of the effectiveness of training and personnel decision-making based on requirements for candidates for military positions of the Armed Forces of Ukraine*. Kyiv.

5. Research work of the Ministry of Defence of Ukraine (SMC PD MOD). (2019). *Justification of effective ways to improve the functioning of the career management system for servicemen of the Armed Forces of Ukraine*. Kyiv.

6. Research work of the Ministry of Defence of Ukraine (SMC PD MOD). (2021). *Justification of the procedure for formation and use of the Candidate Reserve for promotion under the conditions of career management by military ranks*. Kyiv.

7. North, D. C. (1990). *Institutions, Institutional Change and Economic Performance*. Cambridge: Cambridge University Press.

8. Scott, W. R. (2014). *Institutions and Organizations: Ideas, Interests, and Identities* (4th ed.). Los Angeles: SAGE Publications.

9. Krahmann, E. (2003). Conceptualizing Security Governance. *Cooperation and Conflict*, 38(1), 5–26.

10. Huntington, S. P. (1957). *The Soldier and the State: The Theory and Politics of Civil-Military Relations*. Cambridge: Harvard University Press.

11. Feaver, P. D. (2003). *Armed Servants: Agency, Oversight, and Civil-Military Relations*. Cambridge: Harvard University Press.

12. Marler, J. H., Boudreau, J. W. (2021). An evidence-based review of HR analytics. *International Journal of Human Resource Management*, 32(1), 1–36.

13. Falletta, S., Combs, W. (2021). The HR analytics cycle: a seven-step process for building evidence-based HR. *Journal of Organizational Effectiveness*, 8(2), 157–175.

14. NATO Standardization Office. (2021). *STANAG 2116: NATO Codes for Grades of Military Personnel*. Brussels: NATO.

15. NATO. (2016). *Allied Joint Doctrine for Education and Training (AJP-7)*. Brussels: NATO Standardization Office.

16. Akimov, O., Akimova, L. (2025). Competency-based approach to building human resources for public administration in the security and defence sector. *Democratic Governance*, 18(1), 18–27.

17. Zolotov, A. (2025). Kompetentisna model upravlinnia personalom u Zbroinykh sylakh: teoretychne obgruntuvannia ta praktychni aspekty. *Natsionalni interesy Ukrainy*, 11(16), 228–248.

Демчук Людмила, канд. пед. наук, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», ORCID: 0000-0001-5698-7113

Нонік Людмила, доктор філософії, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка, ORCID: 0000-0003-4234-8948

Алпатова Оксана, канд. біол. наук, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», ORCID: 0000-0003-0803-9850

Войналович Ірина, асистент кафедри кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», ORCID: 0009-0000-1811-4928

Demchuk Lyudmila, Ph.D. in Education, Associate Professor, Department of Ecology and Environmental Protection Technologies, Zhytomyr Polytechnic State University, ORCID: 0000-0001-5698-7113

Nonik Lyudmila, Ph.D., Associate Professor, Department of Ecology and Environmental Protection Technologies, Zhytomyr Polytechnic State University, ORCID: 0000-0003-4234-8948

Alpatova Oksana, Ph.D. in Biology, Associate Professor, Department of Ecology and Environmental Protection Technologies, Zhytomyr Polytechnic State University, ORCID: 0000-0003-0803-9850

Voynalovych Iryna, Assistant Professor, Department of Ecology and Environmental Protection Technologies, Zhytomyr Polytechnic State University, ORCID: 0009-0000-1811-4928

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СТРАТЕГІЙ СТАЛОГО УПРАВЛІННЯ ЛІСОВИМИ РЕСУРСАМИ НА ПРИКЛАДІ ЄС ТА УКРАЇНИ

COMPARATIVE ANALYSIS OF SUSTAINABLE FOREST RESOURCE MANAGEMENT STRATEGIES: THE CASE OF THE EU AND UKRAINE

Анотація

У статті здійснено комплексне порівняльне дослідження стратегічних підходів до управління лісовими ресурсами в Європейському Союзі та Україні. Розглянуто ключові положення Нової лісової стратегії ЄС до 2030 року, яка трансформує пріоритети з домінуючої експлуатаційної моделі лісокористування на збереження біорізноманіття, зміцнення поглинальної здатності лісів та підвищення їх адаптивності до кліматичних змін. Окремо проаналізовано механізми імплементації концепції сталого розвитку, що ґрунтується на балансі між економічною ефективністю лісового сектору, соціальною відповідальністю та довгостроковою екологічною стійкістю лісових масивів; наведено приклади політик та інструментів, які забезпечують цю рівновагу (стимулювання багатофункціонального лісокористування, фінансові механізми підтримки малих власників, системи моніторингу стану біорізноманіття). Проаналізовано сучасний стан реформування лісової галузі України: перехід до моделі єдиного державного спеціалізованого підприємства, впровадження цифрових інструментів обліку деревини та поступова децентралізація управлінських повноважень. Виявлено суттєві розбіжності у нормативно-правовому полі: українська система все ще значною мірою спирається на нормативні методи радянського зразка, тоді як європейська модель орієнтується на гнучкі

механізми управління, стимулювання приватних власників та партнерство з місцевими громадами. Розглянуто конкретні бар'єри імплементації європейських підходів в Україні – правову невизначеність щодо прав власності, слабкий громадський контроль, методичні прогалини в оцінці екосистемних послуг – та запропоновано кроки щодо їх подолання.

Окрему увагу приділено впливу воєнних дій на лісовий фонд України та систематизовано ризики (фізичне руйнування лісів, незаконні вирубки, забруднення, мінна небезпека), які ускладнюють відновлення і потребують невідкладного перегляду стратегій охорони й відновлення. Запропоновано пріоритетні заходи для надзвичайного захисту лісів – тимчасове запровадження зон охорони, посилення контролю за переміщенням деревини, створення мобільних груп для екстреного моніторингу та відновлення пошкоджених ділянок. Інтенсивно розглянуто концепцію «наближеного до природи лісівництва», яка є фундаментальною для політик ЄС. Оцінено потенціал впровадження вибіркових та поступових систем рубок в Україні як екологічно раціональної альтернативи суцільним зрубам: зниження ерозійних процесів, збереження мікроклімату й структурної різноманітності лісу, підтримка регенерації цінних порід. Наведено приклади практичних підходів (схеми вибіркових рубок, поступове формування насіннєвих ділянок, регламентування інтенсивності відтворення), а також оцінено адміністративні та економічні умови для їх впровадження. Автор доводить, що перехід до таких методів є не лише екологічною необхідністю, а й умовою для інтеграції України в європейський лісовий простір та відповідності міжнародним стандартам сертифікації. Розглянуто роль лісової сертифікації за стандартами FSC та PEFC як механізму ринкового регулювання сталого лісоуправління. Проаналізовано ситуацію в Україні: хоча частка сертифікованих площ у державних лісгоспах є відносно високою, частина сертифікації має

формальний характер через відсутність ефективного громадського моніторингу та обмежених механізмів контролю за ланцюгом постачання. Проведено порівняльний аналіз досвіду країн Східної Європи (зокрема Польщі та Румунії), які пройшли етапи адаптації до стандартів ЄС; окреслено практичні уроки для українських інституцій: посилення прозорості, залучення незалежних аудиторів, розвиток громадського контролю та стимулювання ринкових переваг сертифікації. Економічний блок дослідження присвячено трансформації моделі доходів у бік капіталізації екосистемних послуг. Проаналізовано механізми компенсації власникам за збереження вуглецю, охорону водних ресурсів і підтримку біорізноманіття, що активно розвиваються в ЄС (платформи торгівлі вуглецевими одиницями, програми агроекологічних платежів, пілотні проєкти з виплат за збереження біорізноманіття).

У висновках узагальнено пріоритетні напрями гармонізації українського лісового законодавства з вимогами Європейської зеленої угоди та рекомендаціями міжнародних стандартів. Наголошено на необхідності побудови стратегії сталого лісоуправління, що базуватиметься на принципах адаптивного менеджменту, проактивного врахування зростаючих пірологічних ризиків та посиленні ролі лісів у забезпеченні кліматичної безпеки. У підсумку підкреслено, що трансформація лісового сектору України є стратегічною передумовою для досягнення екологічної стійкості, економічної життєздатності та відповідності міжнародним зобов'язанням.

Ключові слова: лісові ресурси, стале лісоуправління, лісова політика ЄС, лісове господарство України, біорізноманіття лісів, Європейський зелений курс, екологічна стійкість лісів, екосистемний підхід.

Abstract

This article presents a comprehensive comparative study of strategic approaches to forest resource management in the European Union and Ukraine. It examines the key provisions of the EU's New Forest Strategy for 2030, which shifts priorities from the dominant exploitative model of forest use to the conservation of biodiversity, strengthening the carbon sequestration capacity of forests, and enhancing their adaptability to climate change. Separately, the mechanisms for implementing the concept of sustainable development are analyzed, based on a balance between the economic efficiency of the forest sector, social responsibility, and the long-term ecological sustainability of forest areas; examples of policies and instruments that ensure this balance are provided (promotion of multifunctional forest use, financial support mechanisms for smallholders, and biodiversity monitoring systems). The current state of forestry sector reform in Ukraine is analyzed: the transition to a model of a single state-owned specialized enterprise, the introduction of digital timber accounting tools, and the gradual decentralization of management powers. Significant discrepancies in the regulatory framework have been identified: the Ukrainian system still relies heavily on Soviet-style regulatory methods, whereas the European model focuses on flexible management mechanisms, incentives for private owners, and partnerships with local communities. Specific barriers to implementing European approaches in Ukraine–legal uncertainty regarding property rights, weak public oversight, and methodological gaps in the valuation of ecosystem services–are examined, and steps to overcome them are proposed.

Special attention is given to the impact of military operations on Ukraine's forest resources: risks (physical destruction of forests, illegal logging, pollution, and mine hazards) that complicate restoration and require an urgent review of conservation and restoration strategies are systematized. Priority measures for emergency forest protection are proposed–the temporary establishment of

protected zones, strengthened control over timber movement, and the creation of mobile teams for emergency monitoring and restoration of damaged areas. The concept of "nature-friendly forestry," which is fundamental to EU policies, is examined in depth. The potential for implementing selective and gradual logging systems in Ukraine as an ecologically sound alternative to clear-cutting has been assessed: reducing erosion processes, preserving the microclimate and structural diversity of the forest, and supporting the regeneration of valuable tree species. Examples of practical approaches (selective logging schemes, gradual formation of seed stands, regulation of regeneration intensity) are provided, and the administrative and economic conditions for their implementation are assessed. The author argues that the transition to such methods is not only an ecological necessity but also a prerequisite for Ukraine's integration into the European forest area and compliance with international certification standards. The role of forest certification under FSC and PEFC standards as a market-based mechanism for regulating sustainable forest management is examined. The situation in Ukraine is analyzed: although the share of certified areas in state forestry enterprises is relatively high, part of the certification is of a formal nature due to the lack of effective public monitoring and limited mechanisms for controlling the supply chain. A comparative analysis is conducted of the experience of Eastern European countries (specifically Poland and Romania) that have gone through the stages of adaptation to EU standards; practical lessons for Ukrainian institutions are outlined: increasing transparency, engaging independent auditors, developing public oversight, and promoting the market benefits of certification. The economic section of the study is devoted to the transformation of the revenue model toward the monetization of ecosystem services. It analyzes compensation mechanisms for landowners for carbon sequestration, water resource conservation, and biodiversity support, which are actively developing in the EU (carbon trading platforms, agri-

environmental payment programs, and pilot projects for biodiversity conservation payments).

The conclusions summarize priority areas for harmonizing Ukrainian forestry legislation with the requirements of the European Green Deal and the recommendations of international standards. The need to develop a sustainable forest management strategy based on the principles of adaptive management, proactive consideration of growing pyrological risks, and strengthening the role of forests in ensuring climate security is emphasized. In conclusion, it is emphasized that the transformation of Ukraine's forestry sector is a strategic prerequisite for achieving environmental sustainability, economic viability, and compliance with international obligations.

Keywords: forest resources, sustainable forest management, EU forest policy, forestry of Ukraine, forest biodiversity, European Green Deal, ecological resilience of forests, ecosystem approach.

Постановка проблеми. Сучасний стан світових лісових ресурсів визначається критичними наслідками кліматичних змін і посиленим антропогенним тиском, що вимагає радикального перегляду традиційних підходів до лісоуправління. Для України, яка одночасно проходить євроінтеграційну трансформацію та відновлює території й економіку після воєнних дій, перехід до стратегії сталого лісового господарства має не лише екологічне, а й безпекове та економічне значення. Це передбачає інтеграцію зусиль зі збереження біорізноманіття, підвищення кліматичної стійкості лісових екосистем та раціонального використання деревинних ресурсів.

Проблема полягає у необхідності гармонізації історично сформованої ресурсно-орієнтованої моделі управління лісами в Україні з екосистемним підходом, що пропонує Європейський Союз. Екосистемний підхід орієнтується на збереження структурної і функціональної цілісності лісів,

відновлення деградованих угідь, захист рідкісних видів та забезпечення природних сервісів (зокрема регулювання водного режиму і поглинання вуглецю) більше, ніж максимальне вилучення деревини. Практичні кроки можуть включати: перегляд нормативно-правової бази лісоуправління з урахуванням міжнародних стандартів, впровадження моніторингу біорізноманіття та вуглецевих запасів, стимулювання відновлення лісів природними методами, а також підтримку місцевих громад через програми сталої зайнятості та екологічного консалтингу. Узгодження цих підходів вимагатиме поетапних реформ, інтегрованих планів лісокористування та міжсекторної координації, тобто поєднання наукових досліджень, практичних методик відновлення і соціально-економічних заходів. Такий перехід забезпечить не лише збереження і відтворення лісових ресурсів, а й підвищення кліматичної стійкості країни, зміцнення її екологічної безпеки й довгострокової економічної стабільності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У період 2022–2026 років дослідження сталого лісоуправління отримали новий імпульс. Питання адаптації лісів до кліматичних ризиків детально розглянуто у працях Schmidt & Müller [11], які наголошують на важливості мішаних насаджень для стійкості до пірологічних загроз. В Україні фундаментальні дослідження впливу воєнних дій на лісові екосистеми та розробку стратегій їх відновлення проводили Василюк°О.В. та ін. [2], підкреслюючи роль дистанційного зондування землі. Оцінку екосистемних послуг як фінансового інструменту сталого розвитку проаналізовано у звітах European Forest Institute [10], де ліс розглядається як ключовий актив декарбонізації. Проблеми сертифікації та прозорості ринку деревини в умовах цифрової трансформації 2025–2026 рр. висвітлені у роботах Бондаря А.О. [1].

Автори [5] пропонують конкретні кроки для реформування українського лісового сектору, щоб наблизити його до європейських

стандартів прозорості та екологічності. Зокрема, Замула, І.В.; Танасієва, М.М.; Травін, В.В. [6] аналізують конфлікт інтересів: лісгоспи прагнуть максимізувати дохід від продажу деревини, тоді як природоохоронні заходи (захист рідкісних видів, створення заповідних зон) потребують значних витрат і обмежують вирубку. У статті доводиться, що ці заходи не повинні бути збитковими. Науковці Демчук Л.І., Нонік Л.Ю., Войналович І.М. [3] стверджують, що в сучасних умовах (особливо під час війни та постпрецедентного відновлення) екологічний стан територій і ризики техногенних катастроф безпосередньо впливають на виживання нації та стабільність держави.

У 2026 році спостерігається зростання кількості праць, присвячених використанню штучного інтелекту в лісовій пірології. Сучасні автори [3, 5, 6] описують алгоритми предиктивного аналізу вогню, які базуються на нейромережевих моделях розповсюдження пожеж залежно від вологості підстилки. Це підтверджує тезу про те, що захист довкілля сьогодні неможливий без глибокої інтеграції цифрових рішень.

Метою є проведення порівняльного аналізу стратегій сталого лісоуправління ЄС та України, виявлення інституційних та технологічних розривів, а також обґрунтування рекомендацій щодо впровадження моделі наближеного до природи лісівництва в українські реалії 2026 року.

Виклад основного матеріалу дослідження. Фундаментом лісової політики ЄС у 2026 році залишається «Європейська зелена угода», яка вимагає від країн-членів суворого дотримання балансу між економікою та екологією. На відміну від попередніх десятиліть, сучасна стратегія ЄС базується на жорсткому моніторингу вуглецевого балансу. European Forest Institute [10] зазначає, що ліси ЄС мають стати нетто-поглиначами, що змушує відмовлятися від інтенсивних рубок у старовікових лісах.

В Україні ж основний фокус останніх років був спрямований на реформування структури управління. Створення ДП «Ліси України» дозволило централізувати ресурси, проте, як зауважує Бондар А.О. [1], ризики монополізації та пріоритет прибутку над екологічними функціями залишаються актуальними викликами. Порівняння базових показників наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика моделей лісоуправління

(дані станом на 2025-2026 рр.)

Параметр порівняння	Модель ЄС (середнє)	Модель України
Домінуюча форма власності	Приватна та комунальна (понад 60%)	Державна (понад 98%)
Основний метод рубок	Вибіркові та поступові	Переважно суцільні (з елементами реформи)
Система фінансування	Субсидії за екосистемні послуги	Самофінансування за рахунок продажу деревини
Рівень цифровізації	Глобальний моніторинг	Електронний облік (ЕОД), впровадження ГІС

Концепція «наближеного до природи лісівництва» в Європейському Союзі передбачає відмову від одновікових монокультур на користь багатовікових та видово різноманітних насаджень. Дослідження Schmidt & Müller [11] демонструють, що такі ліси на 40% стійкіші до шкідників і пожеж, оскільки структурна та видовова різноманітність знижує поширення шкідників і послаблює тригерні фактори великих вогнищ. У контексті України впровадження цієї моделі стримується застарілими санітарними правилами та практиками вирубки, проте в Карпатському регіоні вже простежуються позитивні зрушення: місцеві лісгоспи застосовують вибіркову рубку, сприяють природному поновленню та інтегрують підходи з неперервним багатошаровим насадженням.

Екологічний ризик для України у 2026 році має специфічний характер – мінна небезпека великих територій. За даними Василюка О.В. та ін. понад 2,5 млн га лісів потребують спеціалізованого обстеження та розмінування [2].

Європейський Союз планує до 2030 року запровадити оновлену лісову доктрину (табл. 2.).

Таблиця 2

Стратегічні орієнтири розвитку лісового сектору до 2030 року

Пріоритет	Стратегія ЄС 2030	Стратегія розвитку України (проєкт 2026)
Екологічна роль	Сувора охорона старовікових лісів	Відновлення лісів після бойових дій
Економічна модель	Каскадне використання деревини та екосистемні платежі	Поглиблена переробка всередині країни та експорт продукції
Клімат	Збільшення поглинальної здатності	Створення лісів на деградованих землях
Управління	Децентралізація та підтримка приватних власників	Централізація (ДП «Ліси України») з посиленням цифрового контролю

Ця стратегія передбачає радикальний зсув акцентів: від переважного використання лісів з метою експлуатації до пріоритетів, спрямованих на охорону біорізноманіття, посилення здатності лісів поглинати вуглець та покращення їхньої стійкості перед лицем кліматичних трансформацій.

Сьогодні світові лісові ресурси все частіше оцінюються не в кубометрах деревини, а в тонах депонованого вуглецю; це змінює інструменти лісового менеджменту та економічну мотивацію власників. ЄС активно розбудовує ринок вуглецевих кредитів для лісівників, стимулюючи практики, що підвищують біомасу й довгострокове зберігання вуглецю. Згідно з аналізом European Forest Institute [10], Україна має значний

потенціал у цій сфері, зокрема за рахунок самозаліснених земель і деградованих угідь, які потребують легалізації та включення до національних стратегій вуглецевого секвестру. Це відкриває можливості для фінансових механізмів реставрації лісів і залучення інвесторів до відновлення екосистем.

За підходом [8] ними була створена матриця еколого-логістичних ризиків (табл.3.).

Таблиця 3

Оцінка ризиків логістичних операцій у лісовому господарстві

Логістична операція	Екологічний ризик	Рівень впливу (1-10)	Заходи з мінімізації
Трелювання деревини	Ерозія ґрунту, пошкодження підросту	8	Використання канатно-підвісних систем
Транспортування	Викиди CO_2, деградація дорожньої сітки	6	Оптимізація маршрутів (ГІС-моделювання)
Лісозаготівля	Порушення біорізноманіття, пірогенний ризик	9	Наближене до природи лісівництво (вибіркові рубки)
Складування	Захаращення, ризик шкідників	4	Своєчасна вивозка, використання порубкових решток для біоенергетики

Захист довкілля в рамках сталого розвитку передбачає розширення мережі «Смарагдової мережі» в Україні. Конфлікт між заготівлею лісу та охороною природних територій залишається гострим: необхідно поєднувати допустиму промислову діяльність із жорсткими критеріями збереження біорізноманіття. В Україні частка заповідності лісів зросла до 18%, проте якість охорони й інституційного менеджменту залишається нижчою порівняно з німецькими та польськими аналогами; пріоритетними є

посилення ресурсного забезпечення охоронних структур, навчання персоналу та впровадження систем моніторингу стану екосистем.

Лісова пірологія стала ключовою дисципліною лісового менеджменту. Впровадження систем раннього виявлення пожеж (комплекси AI-камер, термальні сенсори та супутниковий контроль) у країнах ЄС дозволило зменшити площі вигорання приблизно на 25% завдяки оперативному виявленню гарячих точок і швидкому реагуванню. В Україні, за даними практик 2025 року, такі системи почали масово впроваджуватися у північних областях з метою запобігання транскордонним пожежам; ефективність підвищується при інтеграції з лісовою охороною, місцевими рятувальними службами та прогнозними моделями пожежної поведінки.

Соціальний аспект сталого розвитку включає підтримку місцевих громад і створення економічних стимулів для збереження лісів. У ЄС лісові кооперативи та місцеві підприємства є основою сільського розвитку, забезпечуючи робочі місця і довгострокові інтереси громад. В Україні реформа 2024–2026 років передбачає відрахування частини прибутку ДП «Ліси України» на розвиток об’єднаних територіальних громад (ОТГ), що є кроком до європейської моделі соціальної відповідальності та місцевого співуправління лісовими ресурсами. Для успіху необхідно забезпечити прозорість розподілу коштів і механізми участі громад у прийнятті рішень.

Сертифікація FSC продовжує виступати гарантом екологічної та соціальної відповідальності лісогосподарської діяльності. На 2026 рік близько 80% державних лісів України мають цей сертифікат, проте Бондар А.О. [1] підкреслює необхідність переходу від кількісних показників сертифікації до якісного моніторингу ланцюгів постачання: важливо забезпечити відстежуваність продуктів від лісу до кінцевого споживача, незалежні аудити та підвищення стандартів управління ризиками незаконних рубок. Використання дронів із LiDAR-сканерами для таксації лісу в Україні

у 2026 році стало стандартною процедурою у провідних лісництва, збільшуючи точність інвентаризації, скорочуючи витрати й пришвидшуючи прийняття управлінських рішень. Це відповідає кращим практикам Скандинавії й потребує подальшого розширення навчання кадрів, інтенсифікації інфраструктури обробки даних та адаптації технологій до місцевих умов.

Нами було запропоновано прогнозовану структуру капіталізації лісових ресурсів України до 2030 р. на основі моделей сталого розвитку.

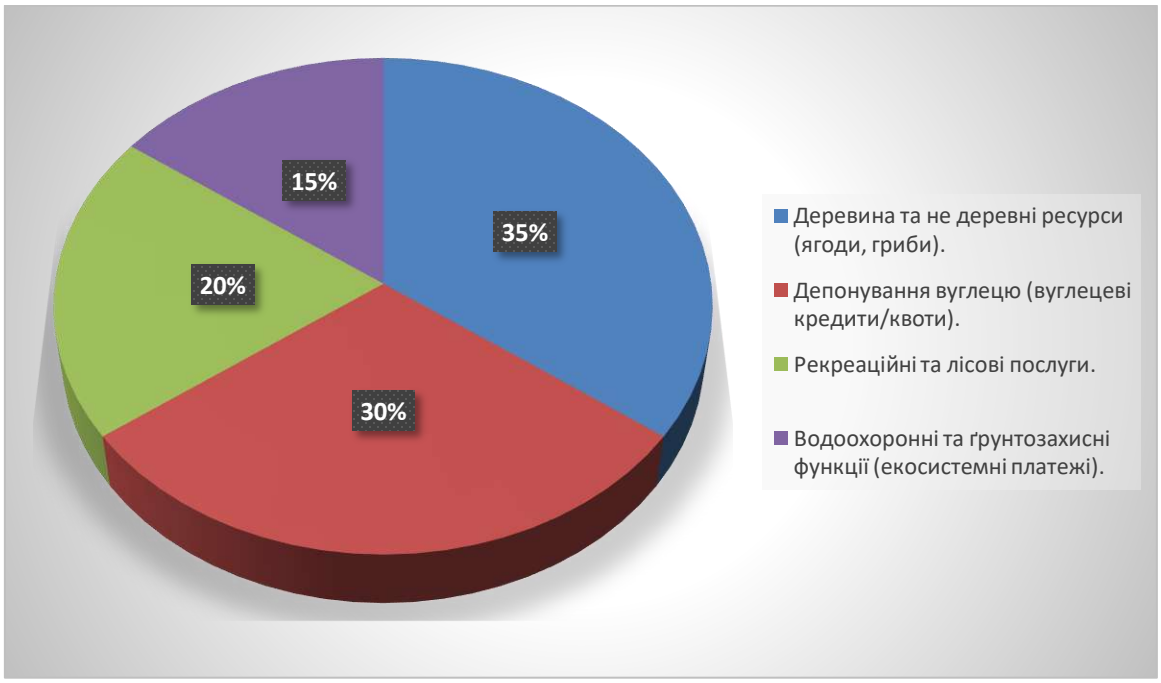


Рис. 1. Прогнозована структура капіталізації лісових ресурсів України до 2030 р. на основі моделей сталого розвитку

Висновки. Порівняльний аналіз засвідчив, що незважаючи на істотний прогрес у цифровізації та інституційних змінах, Україна все ще перебуває в перехідному стані між операційною моделлю лісоуправління та повноцінною екосистемною моделлю. Головною перешкодою залишається відсутність ефективних фінансових механізмів підтримки екологічних функцій лісів, що спричинює надмірну залежність галузі від обсягів заготівлі

деревини. Встановлення системи стимулювання лісовласників через продаж вуглецевих сертифікатів, компенсації за збереження біорізноманіття та механізми платежів за екосистемні послуги (наприклад, відшкодування за захист водних ресурсів і запобігання ерозії) має стати пріоритетом законодавчих ініціатив у 2026–2030 роках. Така політика дозволить диверсифікувати джерела доходів власників лісів і знизити тиск на відновлювані біоресурси.

Стратегія сталого розвитку лісів України повинна враховувати унікальний фактор воєнних пошкоджень і розглядати рекультивацію як можливість впровадження сучасних підходів «наближеного до природи лісівництва». Заміна великих суцільних рубок адаптивними системами, зокрема безперервним покриттям і вибірковими санітарними заходами, сприятиме підвищенню кліматичної стійкості насаджень, збереженню ґенетичної різноманітності та зменшенню ризику деградації ґрунтів. Практичними прикладами можуть слугувати поступове відновлення коридорів дикої флори й фауни, застосування місцевих материнських насаджень для природного відновлення та посилення інженерних заходів з контролю ерозії на деградованих ділянках. Інтеграція в європейський лісовий простір вимагає не лише гармонізації термінології та нормативів, а й глибокої трансформації професійної свідомості управлінців – від моделі «господаря деревини» до ролі «менеджера екосистемних послуг».

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку національної методики оцінки екосистемних активів лісу, включно з кількісною вартісною оцінкою вуглецевих стоків, регулятивних послуг і культурних переваг. Така методика дозволить стандартизувати оцінювання екосистемних послуг, залучити міжнародні інвестиції та фінансові механізми відновлення лісів, а також обґрунтувати участь України в глобальних ініціативах зі скорочення викидів та збереження біорізноманіття.

Література

1. Бондар А.О. Цифрова трансформація лісового сектору України: виклики та перспективи 2025–2026 рр. Науковий вісник НЛТУ. 2025. № 35. С. 12–19. DOI: https://doi.org/10.36930/40350102

2. Василюк О.В. та ін. Вплив воєнних дій на лісові екосистеми України: оцінка збитків та стратегії відновлення. Екологічна безпека та природокористування. 2024. Т. 48. С. 45–60. DOI: https://doi.org/10.32347/2411-4669.2024.48.45-60

3. Демчук Л.І., Нонік Л.Ю., Войналович І.М. Еколого-техногенна безпека, як роль у формуванні стратегії національної безпеки держави. Сучасні вектори розвитку України: забезпечення сталості та безпеки. Збірник матеріалів ІІ Міжнародної науково-¬практичної конференції (м. Київ, 28 жовтня 2024 року). Чернігів: ГО «Науково-¬освітній інноваційний центр суспільних трансформацій», 2024. DOI: https://doi.org/10.54929/conf_28_10_2024-16-01

4. Лялюк А. В. Особливості правового регулювання лісокористування в Україні. Журнал східноєвропейського права. 2018. No 51. С. 232-238. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0374/2018-51/36

5. Кузнецов С. І., Лук’янець А. О., Макаренко О. М. Порівняльна характеристика міжнародного досвіду управління лісовими ресурсами з українським досвідом. Науковий вісник НЛТУ України. 2021. Т. 31, № 2. С. 45–52.

6. Замула, І.В.; Танасієва, М.М.; Травін, В.В. Підходи до оптимізації ефективності природоохоронних заходів у лісовому господарстві. Економіка, управління та адміністрування. № 2 (92) 2020. С. 56-62. DOI: https://doi.org/10.26642/jen-2020-2(92)-56-62

7. Публічний звіт Голови Державного агентства лісових ресурсів України за 2022 р.: державне агентство лісових ресурсів України URL: https://forest.gov.ua/storage/app/ sites/8/publich_zvit/publichnii-vit-za-2022.pdf.

8. Селінний М. М. Корма О. М. Лісове господарство України: сучасний стан та перспективи розвитку. Modern Economics: елект. наук. фах вид. з екон. наук. (м. Миколаїв, жовтень 2019 р.). Миколаїв, 2019. С. 211-217. DOI: https://doi.org/10.31521/modecon.V17(2019)-32

9. Нова лісова стратегія ЄС до 2030 року. https://eurlex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0572

10. European Forest Institute (EFI). The Role of Forests in the EU Green Deal: 2025 Status Report. Joensuu: EFI Press, 2025. 112 p.

11. Schmidt J., Müller K. Climate-Resilient Forestry: Close-to-Nature Management in Central Europe. Berlin: Springer Nature, 2023. 340 p.

12. State of Europe’s Forests 2025. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe. Oslo: Forest Europe, 2025. 210 p.

References

1. Bondar, A. O. (2025). Tsyfrova transformatsiia lisovoho sektoru Ukrainy: vyklyky ta perspektyvy 2025–2026 rr. [Digital transformation of the forest sector of Ukraine: challenges and prospects 2025–2026]. Naukovyi visnyk NLTU [Scientific Bulletin of UNFU], 35, 12–19. https://doi.org/10.36930/40350102

2. Vasyliuk, O. V. et al. (2024). Vplyv voiennykh dii na lisovi ekosystemy Ukrainy: otsinka zbytkiv ta stratehii vidnovlennia [Impact of military actions on forest ecosystems of Ukraine: damage assessment and restoration strategies]. Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia [Environmental Safety and Natural Resources Management], 48, 45–60. https://doi.org/10.32347/2411-4669.2024.48.45-60

3. Demchuk, L. I., Nonik, L. Yu., & Voinalovych, I. M. (2024). Ekolohotekhnohenna bezpeka, yak rol u formuvanni stratehii natsionalnoi bezpeky derzhavy [Ecological and technogenic safety as a role in forming the national security strategy of the state]. Suchasni vektory rozvytku Ukrainy: zabezpechennia stalosti ta bezpeky [Modern development vectors of Ukraine: ensuring sustainability and security]. Kyiv: NGO "Scientific and Educational Innovation Center for Social Transformations". https://doi.org/10.54929/conf_28_10_2024-16-01

4. Lialiuk, A. V. (2018). Osoblyvosti pravovoho rehuliuvannia lisokorystuvannia v Ukraini [Features of legal regulation of forest management in Ukraine]. Zhurnal skhidnoievropeiskoho prava [Journal of Eastern European Law], 51, 232–238. https://doi.org/10.32782/2524-0374/2018-51/36

5. Kuznetsov, S. I., Luk'ianets, A. O., & Makarenko, O. M. (2021). Porivnialna kharakterystyka mizhnarodnoho dosvidu upravlinnia lisovymy resursamy z ukrainskym dosvidom [Comparative characteristics of international experience in forest resource management with Ukrainian experience]. Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy [Scientific Bulletin of UNFU], 31(2), 45–52.

6. Zamula, I. V., Tanasiieva, M. M., & Travin, V. V. (2020). Pidkhody do optymizatsii efektyvnosti pryrodookhoronnykh zakhodiv u lisovomu hospodarstvi [Approaches to optimizing the effectiveness of environmental protection measures in forestry]. Ekonomika, upravlinnia ta administruvannia [Economy, Management and Administration], 2(92), 56–62. https://doi.org/10.26642/jen-2020-2(92)-56-62

7. State Forest Resources Agency of Ukraine. (2022). Publichnyi zvit Holovy Derzhavnoho ahentstva lisovykh resursiv Ukrainy za 2022 r. [Public report of the Head of the State Forest Resources Agency of Ukraine for 2022]. https://forest.gov.ua/storage/app/sites/8/publich_zvit/publichnii-vit-za-2022.pdf

8. Selinnyi, M. M., & Korma, O. M. (2019). Lisove hospodarstvo Ukrainy: suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku [Forestry of Ukraine: current state and de-

velopment prospects]. Modern Economics, 17, 211–217. https://doi.org/10.31521/modecon.V17(2019)-32

9. European Commission. (2021). Nova lisova stratehiia YeS do 2030 roku [New EU Forest Strategy for 2030]. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0572

10. European Forest Institute (EFI). (2025). The Role of Forests in the EU Green Deal: 2025 Status Report. Joensuu: EFI Press.

11. Schmidt, J., & Müller, K. (2023). Climate-Resilient Forestry: Close-to-Nature Management in Central Europe. Berlin: Springer Nature.

12. Forest Europe. (2025). State of Europe’s Forests 2025. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe. Oslo: Forest Europe.

Овсянко Дмитро Сергійович, студент 2 курсу факультету природничої та фізико-математичної освіти, Глухівський національний педагогічний університет імені Олександра Довженка, Україна, ORCID ID: 0009-0003-1830-8441

Ovsianko Dmytro Serhiyovych, 2nd year student, Faculty of Natural Science and Physics-Mathematics Education Oleksandr Dovzhenko, Hlukhiv National Pedagogical University, Ukraine, ORCID ID: 0009-0003-1830-8441

ПРОБЛЕМА ПЛАГІАТУ У СТУДЕНТСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ: ПРИЧИНИ ТА ШЛЯХИ ПОДОЛАННЯ

THE PROBLEM OF PLAGIARISM IN THE STUDENT ENVIRONMENT: CAUSES AND WAYS TO OVERCOME IT

Анотація

У статті розглянуто проблему плагіату у студентському середовищі як однієї з ключових загроз академічній доброчесності у сучасній системі освіти. Проаналізовано основні причини поширення плагіату серед здобувачів освіти, його форми та наслідки. Окрему увагу приділено можливим шляхам подолання цієї проблеми через освітні, організаційні та технологічні заходи. Визначено, що ефективна протидія плагіату потребує комплексного підходу, який поєднує формування етичної культури студентів та впровадження сучасних систем контролю.

Ключові слова: плагіат, академічна доброчесність, студенти, освіта, етична поведінка, антиплагіатні системи.

Abstract

The article examines the problem of plagiarism in the student environment as one of the key threats to academic integrity in the modern education system. The main reasons for the spread of plagiarism among students, its forms and consequences are analyzed. Special attention is paid to possible ways to overcome this problem through educational, organizational and technological measures. It is determined that effective counteraction to plagiarism requires a comprehensive approach that combines the formation of an ethical culture of students and the implementation of modern control systems.

Keywords: plagiarism, academic integrity, students, education, ethical behavior, anti-plagiarism systems.

Постановка проблеми. У сучасній системі вищої освіти проблема плагіату набуває особливої актуальності в умовах стрімкого розвитку цифрових технологій та широкого доступу до інформаційних ресурсів Інтернету. Плагіат як форма академічного порушення полягає у привласненні чужих інтелектуальних результатів без належного оформлення посилань на джерела [1].

Поширення плагіату серед студентів негативно впливає на якість освітнього процесу, рівень сформованості професійних компетентностей та об’єктивність оцінювання навчальних досягнень. Це також призводить до зниження мотивації до самостійної роботи та девальвації результатів навчання.

Окремо слід зазначити, що розвиток цифрового середовища значно спрощує доступ до готових текстів, що підвищує ризики їх неконтрольованого використання. У результаті виникає суперечність між можливостями інформаційних технологій та необхідністю дотримання принципів академічної доброчесності [2].

У зв’язку з цим постає необхідність комплексного аналізу причин виникнення плагіату у студентському середовищі та визначення ефективних шляхів його подолання, що включають як освітні, так і організаційні та технологічні заходи [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема академічної доброчесності та плагіату є одним із ключових напрямів сучасних досліджень у сфері освіти, оскільки безпосередньо пов’язана з якістю підготовки здобувачів освіти та ефективністю освітнього процесу. У міжнародній науковій літературі ця проблематика розглядається як комплексне явище, що охоплює як етичні, так і організаційні аспекти навчальної діяльності.

У працях T. Fishman академічна недоброчесність розглядається не як окремі випадки порушень, а як системна проблема, що має глибокі причини в освітньому середовищі. Автор наголошує, що ефективна протидія плагіату неможлива лише через каральні або контрольні заходи, а потребує цілеспрямованого формування у студентів етичних цінностей, відповідальності та розуміння значення інтелектуальної чесності [1].

У дослідженнях S. Bretag акцент робиться на необхідності впровадження цілісної політики академічної доброчесності у закладах вищої освіти. Така політика повинна включати як превентивні заходи (освітні програми, навчання академічному письму, підвищення інформаційної грамотності), так і контрольні механізми (використання антиплагіатних систем, регламентація академічних процедур). Важливо, що автор підкреслює необхідність інтегрованого підходу, де акцент робиться не лише на виявленні порушень, але й на їх попередженні [2].

Інші наукові дослідження свідчать, що причини поширення плагіату у студентському середовищі є багатофакторними. Серед них виділяють недостатній рівень сформованості навичок академічного письма, низьку

інформаційну грамотність, нерозуміння правил цитування та оформлення джерел. Окремо зазначається вплив високого навчального навантаження та обмеженого часу на виконання навчальних завдань, що може спонукати студентів до використання готових матеріалів без належної обробки [3; 4].

Таким чином, аналіз наукових джерел дозволяє зробити висновок, що проблема плагіату не може розглядатися виключно як індивідуальне порушення студентів. Вона є результатутом поєднання освітніх, організаційних та соціально-психологічних чинників, що вимагає комплексного підходу до її вирішення.

Мета статті. Метою статті є аналіз основних причин виникнення плагіату у студентському середовищі, а також визначення ефективних шляхів його подолання в умовах сучасної системи освіти.

Виклад основного матеріалу. Плагіат у студентському середовищі є складним і багатофакторним явищем, яке охоплює різні форми академічної недоброчесності. До його основних проявів належать пряме копіювання текстових фрагментів без зазначення джерела, компіляція матеріалів із різних джерел без належного оформлення цитувань, перефразування чужих ідей без посилання на автора, а також використання готових робіт або їх частин як власних. У сучасних умовах цифровізації освіти такі практики стають дедалі більш поширеними через легкість доступу до інформаційних ресурсів та розвиток технологій обробки тексту.

Однією з ключових причин виникнення плагіату є недостатній рівень сформованості навичок академічного письма у студентів. Значна частина здобувачів освіти не володіє достатніми знаннями щодо правил цитування, оформлення джерел та коректного використання наукової інформації. Як зазначається в дослідженнях, саме низька інформаційна грамотність часто призводить до ненавмисного плагіату, коли студенти не усвідомлюють, що порушують академічні норми [3; 4]. Це свідчить про необхідність

системного навчання академічному письму вже на початкових етапах здобуття вищої освіти.

Іншим суттєвим фактором є високий навчальний тиск та обмежені часові ресурси. Студенти часто стикаються з великою кількістю завдань у стислі терміни, що спонукає їх до пошуку швидких рішень замість самостійного опрацювання матеріалу. У таких умовах копіювання готових текстів або їх частин сприймається як спосіб зменшення навантаження. Це формує прагматичний підхід до навчання, у якому результат іноді стає важливішим за сам процес здобуття знань.

Важливу роль у поширенні плагіату відіграє також розвиток цифрових технологій. Вільний доступ до великої кількості інформаційних ресурсів в Інтернеті значно спрощує процес пошуку та копіювання текстів. При цьому студенти не завжди критично оцінюють знайдену інформацію та її достовірність. Як наслідок, цифрове середовище одночасно виступає як ресурс для навчання і як фактор ризику для академічної доброчесності.

Окрему групу причин становлять психологічні та мотиваційні чинники. Серед них можна виділити низьку внутрішню мотивацію до навчання, орієнтацію на формальне отримання оцінок, недостатнє розуміння значення самостійної роботи, а також слабко сформовану культуру академічної доброчесності. У працях T. Fishman підкреслюється, що академічна недоброчесність часто має системний характер і пов’язана не лише з індивідуальними порушеннями, а й із загальними цінностями освітнього середовища [1].

Наслідки поширення плагіату є багатовимірними. На індивідуальному рівні він призводить до поверхневого засвоєння знань, втрати навичок критичного мислення та зниження рівня професійної підготовки. Студенти, які систематично використовують плагіат, не формують необхідних компетентностей для майбутньої професійної діяльності. На інституційному

рівні це призводить до зниження якості освітніх результатів та девальвації дипломів про вищу освіту.

З точки зору системи освіти загалом, плагіат підриває довіру до академічних результатів та створює викривлену картину реального рівня підготовки здобувачів освіти. Як зазначає S. Bretag, ефективна протидія академічній недоброчесності повинна базуватися не лише на контролі, але й на формуванні цілісної політики доброчесності в закладах освіти [2].

Подолання проблеми плагіату потребує комплексного підходу, який включає освітні, організаційні та технологічні заходи. Насамперед важливим є формування у студентів базових навичок академічного письма, включаючи правильне цитування, оформлення джерел та роботу з науковою інформацією. Ефективним інструментом є впровадження спеціальних навчальних курсів з академічної доброчесності та інформаційної грамотності.

Не менш важливим є використання сучасних антиплагіатних систем, які дозволяють виявляти текстові запозичення та контролювати рівень унікальності навчальних робіт. Однак дослідження підкреслюють, що технологічний контроль сам по собі не є достатнім і має поєднуватися з педагогічними методами впливу [2; 4].

Особливу роль у запобіганні плагіату відіграє викладач, який виступає не лише як контролер, а й як наставник, що формує у студентів відповідальне ставлення до навчання. Важливим є також створення академічного середовища, в якому чесність, відповідальність та повага до інтелектуальної праці є базовими цінностями.

Таким чином, ефективна протидія плагіату можлива лише за умови поєднання освітніх, організаційних та технологічних підходів, що забезпечують формування цілісної культури академічної доброчесності у закладах вищої освіти.

Висновки. Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що плагіат у студентському середовищі є складним і багатофакторним явищем, яке виникає під впливом як освітніх, так і організаційних та соціально-психологічних чинників. Його поширення значною мірою зумовлене недостатнім рівнем сформованості навичок академічного письма, низькою інформаційною грамотністю студентів, високим навчальним навантаженням, а також недостатньою мотивацією до самостійної пізнавальної діяльності.

Встановлено, що плагіат має негативні наслідки як для окремого здобувача освіти, так і для системи вищої освіти загалом. На індивідуальному рівні він призводить до поверхневого засвоєння знань, втрати навичок критичного мислення та зниження професійної компетентності. На інституційному рівні — до зниження якості освітнього процесу та девальвації академічних результатів, що підриває довіру до системи вищої освіти.

Водночас ефективна протидія плагіату можлива лише за умови комплексного підходу. Він повинен поєднувати освітні заходи, спрямовані на формування навичок академічного письма та інформаційної грамотності, організаційні механізми контролю якості навчальних робіт, а також використання сучасних технологічних засобів перевірки унікальності текстів. Однак технологічні інструменти не можуть бути єдиним засобом вирішення проблеми і повинні доповнюватися виховною та мотиваційною роботою викладачів.

Окремо слід підкреслити важливість формування культури академічної доброчесності як базової цінності освітнього середовища. Саме вона є ключовим чинником довгострокового зменшення рівня плагіату та забезпечення якісної підготовки майбутніх фахівців.

Таким чином, подолання проблеми плагіату потребує системної та цілеспрямованої роботи всіх учасників освітнього процесу, що дозволить

підвищити якість вищої освіти та забезпечити дотримання принципів академічної доброчесності.

Література

1. Fishman T. “The Fundamental Values of Academic Integrity”. Clemson University, International Center for Academic Integrity, 2014.

2. Bretag S. “Handbook of Academic Integrity”. Springer Singapore, 2016.

3. Етичний кодекс учасника освітнього процесу / Укладачі. — 2021.

4. Проблеми та перспективи впровадження антиплагіатних систем в ЗВО. 2022.

References

1. Fishman, T. (2014), *The Fundamental Values of Academic Integrity*, Clemson University, International Center for Academic Integrity, Clemson, USA.

2. Bretag, S. (2016), *Handbook of Academic Integrity*, Springer Singapore, Singapore.

3. Ukladachi (2021), *Etychnyj kodeks uchasnyka osvitn'oho protsesu* [Ethical Code of the Educational Process Participant].

4. "Problemy ta perspektyvy vprovadzhennia antyplahiatnykh system v ZVO" [Problems and prospects of implementing anti-plagiarism systems in higher education institutions], 2022.

Vydavatel:
Publishing house Education and Science s.r.o. IČO : 271 56 877.
Frýdlanská 15/1314 , Praha 8. MS v Praze , oddíl C,vložka 100614

STREDOEVROPSKY VESTNiK

PRO VEDU A VYZKUM

Vol. 2. № 5. 2026

Signed for printing on May 15, 2026
Format 60x90/8. Offset paper and printing Headset Times New Roman.
Mental printing. arc. 6,58. Edition 100 copies.