



Russian-Armenian University

*Printed by the decision of the
Academic Council of RAU*

V E S T N I K
OF RUSSIAN-ARMENIAN UNIVERSITY
(SERIES: PHYSICALMATHEMATICAL
AND NATURAL SCIENCES)

RAU University Press
No. 1/2026

Российско-Армянский университет

*Печатается по решению
Ученого Совета РАУ*

В Е С Т Н И К
РОССИЙСКО-АРМЯНСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
(СЕРИЯ: ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ
И ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ)

Издательство РАУ
№ 1/2026

Главный редактор: академик НАН РА, д.ф.-м.н., проф. *Казарян Э.М.*

Зам. главного редактора: к.ф.-м.н., д.филол.н., проф. *Аветисян П.С.*

Ответственный секретарь: к.х.н. *Шагинян Р.С.*

Редакционная коллегия:

Математика и информатика

Р.Г. Арамян – д.ф.-м.н., проф., Российско-Армянский университет (РАУ), Институт Математики НАН РА

Д.Г. Асатрян – д.т.н., проф., Институт проблем информатики и автоматизации НАН РА

Г.Г. Казарян – д.ф.-м.н., проф., Российско-Армянский университет (РАУ)

О.В. Бесов – член-корр. РАН, д.ф.-м.н., проф., Математический институт им. В.А. Стеклова РАН (Россия)

В.И. Буренков – д.ф.-м.н., проф., Математический институт им. В.А. Стеклова РАН (Россия)

А.Г. Сергеев – академик РАН, д.ф.-м.н., проф., Математический институт им. В.А. Стеклова РАН (Россия)

А.И. Аветисян – академик РАН, д.ф.-м.н., проф., Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН (Россия)

В.Ш. Меликян – член-корр. НАН РА, д.т.н., проф., Российско-Армянский университет (РАУ), Synopsys

Биологические и химические науки

А.А. Аракелян – д.б.н., проф., Российско-Армянский университет (РАУ), Институт Молекулярной биологии НАН РА

В.И. Муронец – д.б.н., проф., Московский государственный университет (МГУ) (Россия)

А.А. Оганесян – к.б.н., доц., Российско-Армянский университет (РАУ)

Р.В. Захарян – к.б.н., Российско-Армянский университет (РАУ)

Г.Г. Данагулян – член-корр. НАН РА, д.х.н., проф., Российско-Армянский университет (РАУ)

К.Б. Назарян – д.б.н., проф., Институт Молекулярной биологии НАН РА

Л.М. Епископосян – д.б.н., проф., Институт Молекулярной биологии НАН РА

А.Б. Киракосян – д.б.н., проф., Массачусетский технологический институт (США)

Физико-технические науки

Д.А. Фирсов – д.ф.-м.н., проф., СПбПУ им. Петра Великого (Россия)

А.В. Папоян – член-корр. НАН РА, д.ф.-м.н., проф., Институт физических исследований НАН РА

С.Г. Петросян – член-корр. НАН РА, д.ф.-м.н., проф., Российско-Армянский университет (РАУ)

А.А. Саркисян – д.ф.-м.н., проф., Российско-Армянский университет (РАУ)

Е.Ш. Мамасахлисов – д.ф.-м.н., проф., Российско-Армянский университет (РАУ)

В.Г. Аветисян – д.т.н., проф., Российско-Армянский университет (РАУ)

Журнал основан в 2003 году и входит в перечень периодических изданий, зарегистрированных ВАК РА и РИНЦ

Российско-Армянский университет, 2026г.

Vestnik of the RAU, No. 1. – Yer.: RAU Publishing House, 2026. – 127 p.

Editor-in-Chief: Academician of NAS RA, D.Sc. in Physics and Mathematics,
Prof. **Kazaryan E.M.**

Deputy Editor-in-chief: Ph.D. in Mathematics, D. Sc. in Philosophy, Prof. **Avetisyan P.S.**

Executive secretary: Ph.D. in Science (Chemistry) **Shaginyan R.S.**

Editorial team

Mathematics and Computer Science

R.G. Aramyan – D. Sc. (Mathematics), Prof., Russian-Armenian University (RAU), Institute of Mathematics NAS RA

D.G. Asatryan – D. Sc. (Technical Sciences), Prof., Institute of Informatics and Automation Problems of NAS RA

G.G. Kazaryan – D. Sc. (Mathematics), Prof., Russian-Armenian University (RAU)

O.V. Besov – corresponding member of RAS, D. Sc. (Mathematics), Prof., Mathematical Institute Named after V.A. Steklov RAS (Russia)

I.A. Burenkov – D. Sc., Prof., Mathematical Institute Named after V.A. Steklov RAS (Russia)

A.G. Sergeev – Academician of the Russian Academy of Sciences, D. Sc. (Mathematics), Prof., Mathematical Institute Named after V.A. Steklov RAS (Russia)

A.I. Avetisyan – Academician of the Russian Academy of Sciences, D. Sc. (Mathematics), Prof., Institute of System Programming Named after V.P. Ivannikov RAS (Russia)

V.Sh. Melikyan – corresponding member of NAS RA, D. Sc. (Technical Sciences), Prof., Russian-Armenian University (RAU), Synopsys

Biological and Chemical Sciences

A.A. Arakelyan – D. Sc. (Biology), Prof., Institute of Molecular Biology NAS RA

I.A. Muronets – D. Sc. (Biology), Prof., Moscow State University (Russia)

A.A. Hovhannisyan – Ph.D. in Science (Biology), Russian-Armenian University (RAU)

R.V. Zakharyan – Ph.D. in Science (Biology), Russian-Armenian University (RAU)

G.G. Danagulyan – corresponding member of NASRA, D. Sc. (Chemistry), Prof., Russian-Armenian University (RAU)

K.B. Nazaryan – D.Sc. (Biology), Prof., Institute of Molecular Biology NAS RA

L.M. Episkoposyan – D.Sc. (Biology), Prof., Institute of Molecular Biology NAS RA

A.B. Kirakosyan – D.Sc. (Biology), Prof., Massachusetts Institute of Technology (USA)

Physical and Technical Sciences

D.A. Firsov – D. Sc. (Physics), Prof., SPbPU Named after Peter the Great (Russia)

A.V. Papoyan – corresponding member of NAS RA, D.Sc. (Physics), Prof., Institute of Physical Research NAS RA

S.G. Petrosyan – corresponding member of NAS RA, D. Sc. (Physics), Prof., Russian-Armenian University (RAU)

A.A. Sargsyan – D.Sc. (Physics), Prof., Russian-Armenian University (RAU)

E.S. Mamasakhlisov – D.Sc. (Physics), Prof., Russian-Armenian University (RAU)

V.G. Avetisyan – D. Sc. (Technical Sciences), Prof., Russian-Armenian University (RAU)

The journal founded in 2003 is included in the list of periodicals registered by HAC RA and RSCI

Russian-Armenian University, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАТИКА

Цирунян В.Д. Модель целочисленного линейного программирования для исследования почти-интервальных реберных раскрасок	9
Микаелян Г. Общие оценки для реберно-хроматических сумм графов.....	19
Саакян В. Визуальная относительная локализация для GNSS-независимого управления роем БПЛА	28
Авагян Т.С., Мовсисян О.М., Асланян А.К. Определение версии компилятора solidity из исходного кода	36
Мелконян В., Смбатян М., Сардарян А. Автоматизированное обнаружение и анализ воздействий снарядов с использованием компьютерного зрения	44
Туманян О., Киракосян Л. Метод организации связи LoRa в беспилотных летательных аппаратах на основе программно-определяемого радио	51
Хачатрян Г.А., Мелконян В.Г., Аванян А.Б., Оганесян О.А. Повторное обнаружение объектов на аэрофотоснимках, полученных с БПЛА	61
Мовсисян О.М., Асланян А.К. Исследование и разработка методов сопоставления исходного и бинарного кода.....	68
Сурменелян К.С., Арамян А.Ж., Оганесян О.А., Смбатян М.М., Погосян В.Т., Маладжян А.А. Алгоритм генерации синтетических данных для задач дистанционного зондирования на основе Unreal Engine 5	76

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Сиволенко Э.Р., Пинамян М.В., Оганнесян Б.А. Исследование и моделирование частотно-модулированных непрерывных волн (ЛЧМ, FMCW) в программно-определяемых радиосистемах на основе открытых средств	85
Оганнесян С.Ж., Сиволенко Э.Р. Исследование и внедрение многочастотного радара непрерывного излучения с использованием систем SDR в среде с открытым исходным кодом и инструментария языка программирования Python	92

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Тумоян Дж. Г. Биосовместимые наночастицы серебра как перспективные противоопухолевые агенты	97
--	----

CONTENTS

MATHEMATICS AND COMPUTER SCIENCE

Tsirunyan V.D. Integer Linear Programming Model for Investigating Near-Interval Edge-Colorings of Complete Bipartite Graphs	9
Mikaelyan H.V. General Bounds on Edge-Chromatic Sums of Graphs.....	19
Sahakyan V. Visual Relative Localization for GNSS-Free Control of UAV Swarm.....	28
Avagyan T., Movsisyan H., Aslanyan H. Solidity Compiler Version Detection from Source Code.....	36
Melkonyan V., Smbatyan M., Sardaryan A. Automated Detection and Analysis of Projectile Impacts Using Computer Vision	44
Tumanyan H., Kirakosyan L. A Software-Defined Radio Approach to LoRa-Based Communication for Unmanned Aerial Vehicles.....	51
Khachatryan G., Melkonyan V., Avanyan A., Hovhannisyan O. Object Re-Detection in Aerial Imagery Captured by Uavs	61
Avagyan T., Movsisyan H., Aslanyan H. Solidity Compiler Version Detection from Source Code.....	68
Surmenelyan K., Aramyan A., Hovhannisyan O., Smbatyan M., Poghosyan V., Malajyan A. Synthetic Data Generation Pipeline for Remote Sensing Tasks Based on Unreal ENGINE 5.....	76

PHYSICAL AND TECHNICAL SCIENCES

Hovhannisyan S., Sivolenko E. Research and Modeling of Frequency-Modulated continuous waves (LFM, FMCW) in Software-Defined Radio Systems based on Open Tools	85
Sivolenko E., Pinamyan M., Hovhannisyan B. Investigation and Implementation of a Multi-Frequency Continuous Wave Radar Using SDR Systems in an Open-Source Environment and the PYTHON Programming Toolkit	92

BIOLOGICAL SCIENCES

J. Tumoyan. Biocompatible Silver Nanoparticles as Promising ANTICANCER Agents.....	97
---	----

МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАТИКА

DOI 10.24412/1829-0450-fm-2026-1-9-18
УДК 519.17

Поступила: 13.01.2026г.
Сдана на рецензию: 14.01.2026г.
Подписана к печати: 19.01.2026г.

INTEGER LINEAR PROGRAMMING MODEL FOR INVESTIGATING NEAR-INTERVAL EDGE-COLORINGS OF COMPLETE BIPARTITE GRAPHS

V. Tsirunyan

*Yerevan State University
vahagn.tsirunyan@ysu.am*

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9465-4176>

ABSTRACT

A proper edge-coloring of a graph G is a mapping $\alpha: E(G) \rightarrow \mathbb{N}$ such that $\alpha(e) \neq \alpha(e')$ for every pair of adjacent edges e and e' in G . If α is a proper edge-coloring of G and $v \in V(G)$, then $S_G(v, \alpha)$ denotes the set of colors appearing on edges incident to v . A proper edge-coloring α of a graph G with colors $1, \dots, t$ is called a near-interval t -coloring if all colors are used, and for each vertex $v \in V(G)$, $S_G(v, \alpha)$ is an interval of integers with no more than one gap. If a graph G has such a coloring, the minimum number of colors in a near-interval coloring of a graph G is denoted by $w^1(G)$. It is known that all complete bipartite graphs admit near-interval colorings. In this paper, we propose an integer linear programming (ILP) model to determine or bound the parameter $w^1(K_{m,n})$ ($m, n \in \mathbb{N}$) for complete bipartite graphs.

Keywords: proper edge-coloring, near-interval coloring, interval coloring, complete bipartite graph, integer linear programming.

Introduction

We use [1, 2] for terminology and notation not defined here. All graphs considered are finite, undirected, and contain no loops or multiple edges. For a graph G , $V(G)$ and $E(G)$ denote the sets of vertices and edges of G , respectively. The degree of a vertex $v \in V(G)$ is denoted by $d_G(v)$, the maximum degree of G by $\Delta(G)$, the chromatic index of G by $\chi'(G)$, and the diameter of G by $diam(G)$.

A proper edge-coloring of a graph G is a mapping $\alpha: E(G) \rightarrow \mathbb{N}$ such that $\alpha(e) \neq \alpha(e')$ for every pair of adjacent edges e and e' in G . If α is a proper edge-coloring of G and $v \in V(G)$, then $S_G(v, \alpha)$ (or $S(v, \alpha)$) denotes the set of colors appearing on edges incident to v . The smallest and largest colors of $S(v, \alpha)$ are denoted by $S(v, \alpha)$ and $\bar{S}(v, \alpha)$, respectively. A near-interval t -coloring (or interval

$(t, 1)$ -coloring) [3, 4] of a graph G is a proper edge-coloring $\alpha: E(G) \rightarrow \{1, \dots, t\}$ such that all colors are used and, for every vertex $v \in V(G)$,

$$d_G(v) - 1 \leq \bar{S}(v, \alpha) - S(v, \alpha) \leq d_G(v).$$

Equivalently, $S_G(v, \alpha)$ is an interval of integers with no more than one gap. A graph G is near-interval colorable if it has a near-interval t -coloring for some $t \in \mathbb{N}$. The set of all near-interval colorable graphs is denoted by \mathfrak{N}^1 . For a graph $G \in \mathfrak{N}^1$, the minimum number of colors in a near-interval coloring of G is denoted by $w^1(G)$.

Near-interval colorings were introduced by Petrosyan and Arakelyan [4] as a natural generalization of interval edge-colorings [5, 6]. Upper bounds on the number of colors in near-interval colorings in terms of $\Delta(G)$, $\text{diam}(G)$, and $|V(G)|$ were obtained in [3, 4]. Recently, Casselgren, Małafiejski, Pastuszak and Petrosyan [7] proved that for subcubic graphs G the problem of determining the exact value of $w^1(G)$ is NP -complete. They also showed that all complete bipartite graphs belong to \mathfrak{N}^1 and initiated the determination of $w^1(K_{m,n})$ as a natural open problem. For complete bipartite graphs, some upper bounds and exact values were obtained in [8].

A complementary line of work uses integer linear programming (ILP) as a computational tool for interval edge-coloring problems. In [9] and [10], ILP formulations and modern solvers were used to study interval colorings and minimum-deficiency problems, showing that well-designed models can produce strong bounds together with certificates of optimality and can therefore serve as an effective aid in conjecture testing. Motivated by these developments, we formulate an ILP model adapted to near-interval colorings of complete bipartite graphs and use it to compute $w^1(K_{m,n})$ for a range of small instances, providing explicit colorings and additional evidence for the structure suggested by existing results.

Integer Linear Programming Model

Our computational approach is guided by integer programming formulations for minimum-deficiency interval coloring developed in [9]. That work discusses four closely related modeling perspectives. In the complete bipartite setting considered here, three of these formulations become equivalent at the level of their linear programming relaxations, leaving essentially two distinct integer formulations, commonly denoted by IP1 and IP2. Since the benchmark experiments in [9] did not report meaningful differences between IP1 and IP2 for the types of instances and objectives relevant to our study, we adopt an IP1-type formulation as it is also the most direct to implement for $K_{m,n}$ in an edge-indexed manner.

We adapt this IP1-type formulation to near-interval edge-colorings. The model minimizes the number of used colors while enforcing (i) a proper edge-coloring and (ii) the near-interval condition via the span constraint $\bar{S}(v, \alpha) - S(v, \alpha) \leq d_G(v)$ at every vertex.

Finally, we incorporate symmetry breaking as described in [9] to reduce the color-permutation symmetry inherent in edge-coloring models. Concretely, we enforce that the set of used colors forms an initial segment $\{1, 2, \dots, t\}$ by the monotonicity constraints $y_c \geq y_{c+1}$, which prunes equivalent solutions without changing feasibility or optimality.

Let $G = K_{m,n}$ with bipartition $V(G) = X \cup Y: X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}, Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$. Also let $C = \{1, 2, \dots, C_{max}\}$ be the set of available colors. It is known that $w^1(K_{m,n}) \leq n + m - \gcd(n, m)$; therefore, $C_{max} = n + m - \gcd(n, m)$. We will denote the coloring derived from the optimal solution of the model described below as α . We introduce the following variables:

- $\forall u \in X, v \in Y: x_{uvc} \in \{0, 1\}$: 1 if edge (u, v) is colored with color c , 0 otherwise.
- $y_c \in \{0, 1\}$: 1 if color c is used in the coloring, 0 otherwise.
- $\forall u \in X: zL_{u,c} \in \{0, 1\}$: 1 if color c is used on some edge incident to vertex $u \in X$.
- $\forall v \in Y: zR_{v,c} \in \{0, 1\}$: 1 if color c is used on some edge incident to vertex $v \in Y$.
- $\forall u \in X: minL_u \in \{1, \dots, C_{max}\}$: Minimum color used at vertex $u \in X$.
- $\forall u \in X: maxL_u \in \{1, \dots, C_{max}\}$: Maximum color used at vertex $u \in X$.
- $\forall v \in Y: minR_v \in \{1, \dots, C_{max}\}$: Minimum color used at vertex $v \in Y$.
- $\forall v \in Y: maxR_v \in \{1, \dots, C_{max}\}$: Maximum color used at vertex $v \in Y$.

We add a constraint to ensure that each edge receives exactly one color:

$$\forall (u, v) \in E: \sum_{c \in C} x_{uvc} = 1$$

We add the following constraints to ensure the proper edge coloring:

$$\forall u \in X, \forall c \in C: \sum_{v \in Y} x_{uvc} \leq 1$$

$$\forall v \in Y, \forall c \in C: \sum_{u \in X} x_{uvc} \leq 1$$

We add a constraint to ensure that if any edge is colored with color c , then $y_c = 1$:

$$\forall c \in C: \sum_{(u,v) \in E(G)} x_{uvc} \leq y_c \cdot |E(G)|$$

We add a constraint to ensure that if color $c + 1$ is used, then color c must also be used:

$$\forall c \in \{1, \dots, C_{max} - 1\}: y_c \geq y_{c+1}$$

We add the following constraints to make sure $zL_{u,c}$ and $zR_{v,c}$ variables are correct:

$$\begin{aligned} \forall u \in X, \forall c \in C: \quad zL_{u,c} &= \sum_{v \in Y} x_{uvc} \\ \forall v \in Y, \forall c \in C: \quad zR_{v,c} &= \sum_{u \in X} x_{uvc} \end{aligned}$$

We add the following constraints to ensure that $\min L_u$ and $\min R_v$ variables are not greater than the minimum colors $S(u, \alpha)$ and $S(v, \alpha)$, respectively.

$$\begin{aligned} \forall u \in X, \forall c \in C: \quad \min L_u &\leq c + C_{\max}(1 - zL_{u,c}) \\ \forall v \in Y, \forall c \in C: \quad \min R_v &\leq c + C_{\max}(1 - zR_{v,c}) \end{aligned}$$

We add the following constraints to ensure that $\max L_u$ and $\max R_v$ variables are not less than the maximum colors $\bar{S}(u, \alpha)$ and $\bar{S}(v, \alpha)$, respectively.

$$\begin{aligned} \forall u \in X, \forall c \in C: \quad \max L_u &\geq c - C_{\max}(1 - zL_{u,c}) \\ \forall v \in Y, \forall c \in C: \quad \max R_v &\geq c - C_{\max}(1 - zR_{v,c}) \end{aligned}$$

We add two more constraints to make sure the resulting coloring will be a near-interval coloring:

$$\begin{aligned} \forall u \in X: \quad \max L_u - \min L_u &\leq d_G(u) \\ \forall v \in Y: \quad \max R_v - \min R_v &\leq d_G(v) \end{aligned}$$

And finally, we add the objective to minimize the total number of colors used:

$$\min \sum_{c \in C} y_c$$

It is easy to see that any feasible solution in the search space to the model described above will correspond to a near-interval coloring, and the optimal one will result in a near-interval t coloring, where $t = w^1(K_{m,n})$. All variables and constraints are implemented using Gurobi's Python API and can be verified in the source code at our github repository.

Main results

Recently Petrosyan and Tsirunyan obtained the following results.

Theorem 1. [8] For any $n, k, c \in \mathbb{N}$ with $c \leq k$, we have

$$w^1(K_{n,(n+1)k-c}) = (n+1)k - c.$$

Corollary 1. [8] For any $n \in \mathbb{N}$, for any $m \in \mathbb{N}$ with $n^2 \leq m$, we have

$$w^1(K_{m,n}) = m.$$

Proposition 1. [8] For any $m, n \in \mathbb{N}$, we have

$$w^1(K_{m,n}) \leq m + n + \min\{-gcd(m, n), 1 - gcd(m+1, n), 1 - gcd(m, n+1), 2 - gcd(m+1, n+1)\}.$$

Corollary 2. [8] For any $n, m \in \mathbb{N}$ with $m \leq n$ and $n+1 \equiv 0 \pmod{m+1}$, we have

$$n \leq w^1(K_{m,n}) \leq n+1.$$

Using the integer linear programming model described above, we were able to obtain the following result.

Theorem 2. For any $n, m \in \mathbb{N}$ with $m \leq n$, $\max(n, m) \leq 20$ and $n + 1 \equiv 0 \pmod{m + 1}$, we have $w^1(K_{m,n}) = n$.

Proof. For the cases $n = m$ and $m = 1$ the proof is trivial as $w(K_{n,n}) = w(K_{1,n}) = n$. In case $m = 2$, there are no pairs $(2, n)$ such that $n \leq m^2$ and $n + 1 \equiv 0 \pmod{3}$. Therefore, using corollary 2 we can deduce that for any $w^1(K_{2,n}) = n$ where $n \equiv 2 \pmod{3}$.

To complete the proof, it is sufficient to prove the statement above for pairs $(3,7)$, $(3,11)$, $(3,15)$, $(3,19)$, $(4,9)$, $(4,14)$, $(4,19)$, $(5,11)$, $(5,17)$, $(6,13)$, $(6,20)$, $(7,15)$, $(8,17)$, $(9,19)$. You can find all colorings for the given complete bipartite graphs below.

Table 1. The near-interval 7-coloring of $K_{3,7}$.

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7
x_1	2	1	7	4	5	3	6
x_2	4	2	6	5	7	1	3
x_3	1	3	5	7	6	2	4

Table 2. The near-interval 11-coloring of $K_{3,11}$.

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}	y_{11}
x_1	8	1	4	5	10	7	2	6	3	9	11
x_2	6	2	1	4	9	8	3	7	5	11	10
x_3	5	3	2	7	11	10	1	4	6	8	9

Table 3. The near-interval 15-coloring of $K_{3,15}$.

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}	y_{15}
x_1	1	9	13	15	11	8	7	2	14	10	12	5	6	3	4
x_2	2	10	15	14	9	11	6	4	12	8	13	3	7	1	5
x_3	3	12	14	13	8	10	9	1	15	7	11	6	5	4	2

Table 4. The near-interval 19-coloring of $K_{3,19}$.

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}	y_{15}	y_{16}	y_{17}	y_{18}	y_{19}
x_1	17	15	4	6	9	10	3	5	11	14	16	18	2	12	19	13	8	1	7
x_2	18	17	5	7	12	9	2	3	10	15	13	19	1	11	16	14	6	4	8
x_3	19	16	3	8	10	7	1	6	13	12	15	17	4	14	18	11	9	2	5

Table 5. The near-interval 9-coloring of $K_{4,9}$.

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9
x_1	6	4	5	7	9	2	1	8	3
x_2	8	1	6	9	7	3	5	4	2
x_3	9	3	7	6	8	1	2	5	4
x_4	7	2	9	8	5	4	3	6	1

Table 6. The near-interval 14-coloring of $K_{4,14}$.

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}
x_1	10	12	9	4	7	13	5	14	2	8	3	6	1	11
x_2	8	11	5	2	10	14	9	12	3	6	1	7	4	13
x_3	6	13	7	5	9	12	8	11	1	10	4	3	2	14
x_4	9	14	8	1	11	10	6	13	5	7	2	4	3	12

Table 7. The near-interval 19-coloring of $K_{4,19}$.

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}	y_{15}	y_{16}	y_{17}	y_{18}	y_{19}
x_1	6	1	18	19	12	5	10	17	7	9	15	16	11	13	2	4	14	3	8
x_2	4	5	16	15	10	2	11	19	9	8	17	18	12	14	3	1	13	7	6
x_3	8	3	14	18	9	1	12	15	6	11	19	17	13	16	4	2	10	5	7
x_4	5	2	15	17	13	4	14	18	8	7	16	19	10	12	1	3	11	6	9

Table 8. The near-interval 11-coloring of $K_{5,11}$.

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}	y_{11}
x_1	5	1	4	9	3	8	10	11	6	7	2
x_2	3	4	2	8	1	10	11	9	7	6	5
x_3	1	3	5	10	2	7	6	8	9	11	4
x_4	6	2	3	7	4	11	9	10	5	8	1
x_5	2	6	1	11	5	9	8	7	4	10	3

Table 9. The near-interval 17-coloring of $K_{5,17}$.

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}	y_{15}	y_{16}	y_{17}
x_1	7	16	15	6	11	9	17	14	2	5	4	10	12	13	8	3	1
x_2	6	11	17	10	12	7	15	13	1	3	2	8	14	16	9	5	4
x_3	4	13	12	7	9	8	14	16	5	1	3	11	15	17	10	2	6
x_4	9	12	14	8	7	10	13	17	4	2	5	6	16	15	11	1	3
x_5	8	14	13	11	10	5	16	15	3	6	1	9	17	12	7	4	2

Table 10. The near-interval 13-coloring of $K_{6,13}$.

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}	y_{11}	y_{12}	y_{13}
x_1	4	3	8	1	9	5	11	7	2	12	13	10	6
x_2	1	7	9	5	13	2	10	6	4	8	11	12	3
x_3	7	6	12	4	11	1	8	5	3	9	10	13	2
x_4	5	4	10	7	12	3	13	2	6	11	9	8	1
x_5	2	1	13	3	8	6	9	4	5	10	12	11	7
x_6	6	5	11	2	10	7	12	3	1	13	8	9	4

Table 11. The near-interval 20-coloring of $K_{6,20}$.

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}	y_{15}	y_{16}	y_{17}	y_{18}	y_{19}	y_{20}
x_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
x_2	3	5	1	8	6	4	2	12	11	13	7	10	9	15	16	20	18	14	17	19
x_3	7	1	5	9	2	3	4	10	14	12	6	13	8	17	11	15	16	19	20	18
x_4	4	3	7	5	1	2	6	9	13	15	10	8	11	18	12	17	19	20	14	16
x_5	2	6	4	7	3	1	5	13	8	16	9	11	12	20	10	19	14	15	18	17
x_6	6	7	2	3	4	5	1	14	12	11	8	9	10	19	13	18	20	17	16	15

Table 12. The near-interval 15-coloring of $K_{7,15}$.

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}	y_{15}
x_1	7	8	2	13	3	5	12	14	11	6	4	15	10	9	1
x_2	2	3	6	14	5	1	11	12	13	4	7	9	15	10	8
x_3	4	1	3	10	2	6	14	9	15	7	8	12	13	11	5
x_4	8	7	5	9	4	2	10	13	14	1	6	11	12	15	3
x_5	3	4	1	12	6	8	15	10	9	5	2	14	11	13	7
x_6	6	5	8	15	7	3	13	11	12	2	1	10	9	14	4
x_7	5	6	4	11	1	7	9	15	10	8	3	13	14	12	2

Table 13. The near-interval 17-coloring of $K_{8,17}$.

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}	y_{15}	y_{16}	y_{17}
x_1	2	9	3	7	5	1	8	4	14	16	10	11	13	15	12	17	6
x_2	7	2	4	6	8	5	3	1	15	14	13	17	16	12	9	11	10
x_3	9	5	2	1	6	3	4	7	12	17	15	13	10	16	11	14	8
x_4	3	4	8	2	1	7	5	6	11	10	14	12	17	9	15	16	13
x_5	4	1	5	8	2	6	7	3	16	9	12	14	15	17	10	13	11
x_6	5	3	6	4	7	2	1	8	13	11	17	15	9	10	16	12	14
x_7	6	7	1	3	4	8	2	5	17	15	16	10	14	11	13	9	12
x_8	1	8	9	5	3	4	6	2	10	13	11	16	12	14	17	15	7

Table 14. The near-interval 19-coloring of $K_{9,19}$.

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}	y_{15}	y_{16}	y_{17}	y_{18}	y_{19}
x_1	3	14	12	7	8	17	1	4	10	11	2	16	6	18	9	19	5	15	13
x_2	5	19	16	11	3	14	6	2	8	17	9	12	1	13	4	10	7	18	15
x_3	1	18	15	4	2	12	10	3	5	14	6	11	7	19	8	13	9	16	17
x_4	2	17	11	6	7	15	9	5	1	13	4	14	10	16	3	12	8	19	18
x_5	9	11	14	5	6	19	3	10	2	16	8	18	4	17	7	15	1	13	12
x_6	6	15	19	9	10	11	7	8	4	18	5	13	2	12	1	16	3	17	14
x_7	7	13	17	2	5	16	4	9	3	12	1	15	8	11	10	18	6	14	19
x_8	8	12	13	10	4	18	5	1	9	19	7	17	3	15	6	14	2	11	16
x_9	4	16	18	8	1	13	2	6	7	15	3	19	9	14	5	17	10	12	11

□

Based on our computer experiments, we strongly believe that the following conjecture is true.

Conjecture 1. For any $n, m \in \mathbb{N}$ with $m \leq n$ and $n + 1 \equiv 0 \pmod{m + 1}$, we have $w^1(K_{n,m}) = n$.

As a result of our computer experiments we have found the exact values of $K_{n,m}$ for all $n, m \in \mathbb{N}$ with $n, m \leq 20$.

Table 15. Exact values of $w^1(K_{n,m})$ with $n, m \leq 20$.

n/m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
3	3	3	3	4	6	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
4	4	4	4	4	5	7	8	8	9	10	12	12	13	14	15	16	17	18	19	20
5	5	5	6	5	5	6	9	10	10	10	11	12	14	15	15	16	17	18	20	20
6	6	6	6	7	6	6	7	10	11	12	12	12	13	14	16	17	18	18	19	20
7	7	7	7	8	9	7	7	8	12	13	14	15	14	14	15	16	19	20	21	21
8	8	8	8	8	10	10	8	8	9	13	15	15	17	17	16	16	17	18	21	22
9	9	9	9	9	10	11	12	9	9	10	15	16	17	18	19	20	18	18	19	20
10	10	10	10	10	10	12	13	13	10	10	11	16	18	19	19	21	22	22	20	20
11	11	11	11	12	11	12	14	15	15	11	11	12	18	20	21	21	22	24	25	25
12	12	12	12	12	12	12	15	15	16	16	12	12	13	19	21	22	23	23	25	26
13	13	13	13	13	14	13	14	17	17	18	18	13	13	14	21	23	24	25	25	26
14	14	14	14	14	15	14	14	17	18	19	20	19	14	14	15	22	25	26	27	27
15	15	15	15	15	15	16	15	16	19	19	21	21	21	15	15	16	24	26	28	28
16	16	16	16	16	16	17	16	16	20	21	21	22	23	22	16	16	17	25	28	29
17	17	17	17	17	17	18	19	17	18	22	22	23	24	25	24	17	17	18	27	30
18	18	18	18	18	18	18	20	18	18	22	24	23	25	26	26	25	18	18	19	28
19	19	19	19	19	20	19	21	21	19	20	25	25	25	27	28	28	27	19	19	20
20	20	20	20	20	20	20	21	22	20	20	25	26	26	27	28	29	30	28	20	20

Observation. For all $n, m \in \mathbb{N}$ with $n, m \leq 20$ we have the following:

$$\max_{n, m \leq 20} \left(\frac{w^1(K_{n, m})}{\max(n, m)} \right) = 1.5.$$

Proof. It is easy to see from Table 1 that this value is correct and was achieved using $n = 17, m = 20$ or $n = 20, m = 17$ \square

Conclusion

This work is devoted to the study of near-interval colorings of complete bipartite graphs. In particular, new exact values of $w^1(K_{m, n})$ were obtained for some complete bipartite graphs.

The main results obtained in this work are the following:

For any $n, m \in \mathbb{N}$ with $m \leq n$, $\max(n, m) \leq 20$ and $n + 1 \equiv 0 \pmod{m + 1}$, we have

$$w^1(K_{m, n}) = n.$$

For all $n, m \in \mathbb{N}$ with $n, m \leq 20$ we have the following:

$$\max_{n, m \leq 20} \left(w^1(K_{n, m}) / \max(n, m) \right) = 1.5$$

We also formulate the following conjectures:

For any $n, m \in \mathbb{N}$ with $m \leq n$ and $n + 1 \equiv 0 \pmod{m + 1}$, we have

$$w^1(K_{m, n}) = n.$$

Acknowledgements

We would like to express our gratitude to Petros A. Petrosyan and Lilit T. Bareghamyan for useful discussions on the subject.

REFERENCES

1. *Asratian A., Denley T.M.J., Haggkvist R.* Bipartite Graphs and their Applications. Cambridge: "Cambridge University Press", 1998.
2. *West D.* Introduction to Graph Theory. New Jersey: "Prentice-Hall", 2001.
3. *Petrosyan P., Arakelyan H., and Baghdasaryan V.* A generalization of interval edge-colorings of graphs // "Discrete Applied Mathematics". Vol. 158, № 16. PP. 1827–1837, 2010.
4. *Petrosyan P. and Arakelyan Z.* On a generalization of interval edge colorings of graphs // "Mathematical Problems of Computer Science". Vol. 29, 2007. PP. 26–32.
5. *Asratian A., Kamalian R.* Interval colorings of edges of a multigraph // "Appl. Math", № 5, 1987. PP. 25–34 (in Russian).
6. *Asratian A., Kamalian R.* Investigation on interval edge-colorings of graphs // "J. Combin. Theory". Ser. B, № 62, 1994. PP. 34–43.
7. *Casselgren C., Malafejski M., Pastuszak K. and Petrosyan P.* Near-interval edge colorings of graphs // "Discrete Applied Mathematics". Vol. 372, 2025. PP. 23–36.
8. *Petrosyan P., Tsirunyan V.* Near-interval edge-colorings of complete bipartite graphs // "Proceedings of the YSU A: Physical and Mathematical Sciences", Submitted.
9. *Bodur M., James Luedtke R.* Integer Programming Formulations for Minimum Deficiency Interval Coloring, Optimization Online, July 2016. Available at: <https://optimization-online.org/wp-content/uploads/2016/07/5556.pdf> (Accessed Jan. 9, 2026).

10. Zehui Sh., Zepeng Li, Bo Wang, Shaohui Wang and Xiujun Zhang. Interval edge-coloring: A model of curriculum scheduling // “AKCE International Journal of Graphs and Combinatorics”. Vol. 17, № 3. PP. 725–729, 2020. DOI: 10.1016/j.akcej.2019.09.003.
11. Gurobi Optimization, LLC // “Gurobi Optimizer Reference Manual”, 2024. Available at: <https://www.gurobi.com>.

МОДЕЛЬ ЦЕЛОЧИСЛЕННОГО ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧТИ- ИНТЕРВАЛЬНЫХ РЕБЕРНЫХ РАСКРАСОК

В.Д. Цирунян

*Ереванский государственный университет
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9465-4176>*

АННОТАЦИЯ

Правильной реберной раскраской графа G называется отображение $\alpha: E(G) \rightarrow \mathbb{N}$, такое что $\alpha(e) \neq \alpha(e')$ для любой пары смежных ребер e и e' графа G . Если α -правильная реберная раскраска графа G и $v \in V(G)$, то через $S_G(v, \alpha)$ обозначается множество цветов, встречающихся на ребрах, инцидентных вершине v .

Правильная реберная раскраска α графа G цветами $1, \dots, t$ называется «почти-интервальной t -раскраской», если используются все цвета и для каждой вершины $v \in V(G)$ множество $S_G(v, \alpha)$ является интервалом целых чисел, содержащим не более одного разрыва. Если граф G допускает такую раскраску, то минимальное число цветов в почти-интервальной раскраске графа G обозначается через $w^1(G)$. Известно, что все полные двудольные графы допускают почти-интервальные раскраски.

В данной работе предлагается модель целочисленного линейного программирования для определения или оценки параметра $w^1(K_{m,n})$ ($m, n \in \mathbb{N}$) для полных двудольных графов.

Ключевые слова: правильная реберная раскраска, почти-интервальная раскраска, интервальная раскраска, полный двудольный граф, целочисленное линейное программирование.

DOI 10.24412/1829-0450-fm-2026-1-19-27
УДК 519.174.7

Поступила: 06.02.2026г.
Сдана на рецензию: 12.02.2026г.
Подписана к печати: 28.02.2026г.

GENERAL BOUNDS ON EDGE-CHROMATIC SUMS OF GRAPHS

H. Mikaelyan

Yerevan State University

hamlet.miqayelyan@ysu.am

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9642-7667>

ABSTRACT

Proper edge-coloring of a graph is a mapping from its edges to natural numbers so that adjacent edges receive different numbers (colors). The edge-chromatic sum of the graph is the minimum sum of the colors on all edges among all proper edge-colorings of the graph. This work aims to find lower and upper bounds of the edge-chromatic sum parameter of graphs. Two lower and two upper bounds are obtained, they are compared with some existing results. It is also shown that both bounds are efficient for certain classes of graphs and for each bound there are graphs, for which it is more efficient than the other one.

Keywords: edge-chromatic sum, proper edge-coloring.

Introduction

A proper vertex-coloring (edge-coloring) of a graph G is a mapping from its vertices (edges) to numbers $1, 2, 3, \dots$ so that adjacent vertices (edges) map to different numbers. The vertex-chromatic (edge-chromatic) sum of the graph is the minimum sum of colors on all vertices (edges) in any proper vertex-coloring (edge-coloring). It is denoted by $\Sigma(G)$ ($\Sigma'(G)$).

The problem of finding the vertex-chromatic sum of the graph or shortly the chromatic sum problem was first suggested by Supowit in 1987 [1] and independently by Kubicka and Schwenk in 1989 [2]. Similarly, in 1998, Bar-Noy et al defined the problem of finding the edge chromatic sum [3]. The problems have applications in integrated circuit design and resource allocation [1, 2, 3]. Both problems are NP-complete in general [2, 3] but a lot of estimation results are known for both parameters. Thomassen et al. [4] showed that for any graph G , $\Sigma(G) \leq |V(G)| + |E(G)|$. They also showed that for any graph G with no isolated vertices $\lceil \sqrt{8|E(G)|} \rceil \leq \Sigma(G) \leq 3|E(G)|$. Kokosiński and Kwarciński obtained $\Sigma(G) \geq |V(G)| + \frac{s(G)(s(G)-1)}{2}$ for any graph in [5]. Other general bounds for $\Sigma(G)$ can be found in [5, 6, 7]. Salavatipour found the exact value of the edge-chromatic sum of chain bipartite graphs and a tight upper bound for split graphs [8]. Petrosyan and Kamalian provided the exact value of the edge-chromatic sum of complete graphs

and two upper bounds for certain split graphs [9]. Petrosyan found an upper bound on edge-chromatic sum of almost regular graphs in [10].

Despite many results on specific graph types, a comprehensive analysis of the lower and upper bounds of edge-chromatic sums for graphs in general is an area of examination yet. Our goal is to find the lower and upper bounds of edge-chromatic sums depending on the main parameters of the graph, such as vertex count, edge count, the degrees of the graph vertices, etc. We compare the existing and newly suggested bounds, provide graph types for which the bounds are tight, and provide graph types for each bound for which they are more efficient than the others.

Definitions

We consider only finite, undirected, and simple graphs. Basic terms not defined here (graph, vertex, edge, etc.) can be found in [11]. We denote the vertex and edge sets of graph G by $V(G)$ and $E(G)$ respectively. We denote by $d_G(v)$ the degree of the vertex v in the graph G and $\Delta(G)$ is the maximum degree in graph G . Line graph $L(G)$ of graph G is the graph with vertex set $E(G)$ and the two vertices of $L(G)$ are connected by an edge if and only if the corresponding edges have a common vertex in G .

The chromatic index of graph G is denoted by $\chi'(G)$ and the maximum matching size is denoted by $\alpha'(G)$. Proper edge-colorings, for which the sum of colors on all edges is equal to $\Sigma'(G)$ are called sum edge-colorings and the minimal number of colors needed for a sum edge-colorings is called the edge-strength of the graph G and is denoted by $s'(G)$. Edge-colorings that use c colors will be written edge c -colorings sometimes. Obviously, $\Delta(G) \leq \chi'(G) \leq s'(G)$. Note that Hajiabolhasan [12] proved that $s'(G) \leq \Delta(G) + 1$.

Main Results

Lower Bounds

Consider a graph G . First, consider the lower bounds on $\Sigma'(G)$.

This simple result is mentioned as a fact that immediately derives from the definition of edge-coloring in [13] and is also provided as a result in the context of line graphs in [3].

Lemma 1. For any graph G , we have

$$\Sigma'(G) \geq \left\lceil \frac{1}{4} \sum_{v \in V(G)} d_G^2(v) + \frac{1}{2} |E(G)| \right\rceil.$$

Proof. Consider the sum edge-coloring α of graph G . For any $v \in V(G)$,

$$\sum_{u \in N_G(v)} \alpha(vu) \geq 1 + 2 + \dots + d_G(v) = \frac{d_G(v)(d_G(v) + 1)}{2},$$

since the colors on the edges adjacent to v are natural numbers that are pairwise distinct. On the other hand,

$$\begin{aligned}
 \sum' (G) &= \sum_{e \in E(G)} \alpha(e) = \frac{1}{2} \sum_{v \in V(G)} \sum_{u \in N_G(v)} \alpha(vu) \\
 &\geq \frac{1}{2} \sum_{v \in V(G)} \frac{d_G(v)(d_G(v) + 1)}{2} \\
 &= \frac{1}{4} \sum_{v \in V(G)} d_G^2(v) + \frac{1}{4} \sum_{v \in V(G)} d_G(v) \\
 &= \frac{1}{4} \sum_{v \in V(G)} d_G^2(v) + \frac{1}{2} |E(G)|.
 \end{aligned}$$

If we use the Sedrakyan's inequality as follows:

$$\sum_{v \in V(G)} \frac{d_G^2(v)}{1} \geq \frac{(\sum_{v \in V(G)} d_G(v))^2}{|V(G)|} = \frac{4|E(G)|^2}{|V(G)|},$$

we can obtain a lower bound that depends only on the number of vertices and edges:

Corollary 1. For any graph G ,

$$\sum' (G) \geq \left\lfloor \frac{|E(G)|^2}{|V(G)|} + \frac{1}{2} |E(G)| \right\rfloor.$$

Since $\Sigma'(G) = \Sigma(L(G))$, existing results on the lower bound of $\Sigma(G)$ can be translated in edge-coloring terms. For instance, note that Bar-Noy et al. [3] provided a lower bound $\Sigma(G) \geq |V(G)| + \frac{|E(G)|}{\Delta(G)}$ in the proof of their Theorem 4.3. If we use $\Sigma'(G) = \Sigma(L(G))$ to find a similar result for edge-chromatic sums as follows:

$$\begin{aligned}
 \Sigma'(G) &= \Sigma(L(G)) \geq |V(L(G))| + \frac{|E(L(G))|}{\Delta(L(G))} \\
 &= |E(G)| + \frac{\sum_{v \in V(G)} d_G(v)(d_G(v) - 1)}{2\Delta(L(G))},
 \end{aligned}$$

then considering $\Delta(L(G)) \leq 2\Delta(G) - 2$, this will not give us a better result than Lemma 1 gives us (considering $\Delta(G) > 1$):

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{4} \sum_{v \in V(G)} d_G^2(v) + \frac{|E(G)|}{2} - \left(|E(G)| + \frac{\sum_{v \in V(G)} d_G(v)(d_G(v) - 1)}{4\Delta(G) - 4} \right) &\geq \\
 &\geq \frac{(\Delta(G) - 2)(\sum_{v \in V(G)} d_G^2(v) - 2|E(G)|)}{4\Delta(G) - 4} \geq 0.
 \end{aligned}$$

There is also a lower bound of $\Sigma(G)$ obtained by Thomassen et al in [4], which gives us that

$$\begin{aligned} \sum' (G) &= \sum (L(G)) \geq \left\lceil \sqrt{8|E(L(G))|} \right\rceil \\ &= \left\lceil 2 \sqrt{\sum_{v \in V(G)} d_G(v)(d_G(v) - 1)} \right\rceil. \end{aligned}$$

But if we compare the squares of numbers $\frac{1}{4} \sum_{v \in V(G)} d_G^2(v) + \frac{1}{2}|E(G)|$ and $2 \sqrt{\sum_{v \in V(G)} d_G(v)(d_G(v) - 1)}$, we will see that the first expression is always greater when $|E(G)| > 4$ (let us denote $\sum_{v \in V(G)} d_G^2(v)$ by x for simplicity):

$$\begin{aligned} &\left(\frac{x + 2|E(G)|}{4} \right)^2 - 4 \sum_{v \in V(G)} d_G(v)(d_G(v) - 1) = \\ &= \frac{(x + 2|E(G)|)^2 - 64x + 128|E(G)|}{16} = \\ &= \frac{(x + 2|E(G)| - 32)^2 + 256(|E(G)| - 4)}{16} \geq 0. \end{aligned}$$

By checking all the remaining graphs where $|E(G)| \leq 4$ manually, we obtain that the lower bound given in Lemma 1 is always not less optimal.

Now we obtain one more lower bound.

Lemma 2.

For a graph G and any integer k that satisfies $0 \leq k \leq s'(G) + 1$, we have:

$$\begin{aligned} \sum' (G) &\geq k \left(|E(G)| - \frac{\alpha'(G)(k-1)}{2} \right) + \\ &+ \frac{(s'(G) - k)(s'(G) - k + 1)}{2}. \end{aligned}$$

Proof. Let α be any sum edge $s'(G)$ -coloring of G . For each color i ($1 \leq i \leq s'(G)$), denote the number of edges that are assigned with the color i in α by c_i . We know that $1 \leq c_i \leq \alpha'(G)$. To complete the proof, we can see that for any $0 \leq k \leq s'(G)$,

$$\begin{aligned} \sum' (G) &= \sum_{i=1}^{s'(G)} i \cdot c_i = \sum_{i=1}^{s'(G)} (k + (i - k)) \cdot c_i = \\ &= \sum_{i=1}^{s'(G)} k \cdot c_i - \sum_{i=1}^k (k - i) \cdot c_i + \\ &+ \sum_{i=k+1}^{s'(G)} (i - k) \cdot c_i = k|E(G)| - \sum_{i=1}^k (k - i) \cdot c_i + \sum_{i=k+1}^{s'(G)} (i - k) \cdot c_i \geq \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\geq k|E(G)| - \sum_{i=1}^k (k-i) \cdot \alpha'(G) + \sum_{i=k+1}^{s'(G)} (i-k) \cdot 1 = \\
 &= k \left(|E(G)| - \frac{\alpha'(G)(k-1)}{2} \right) \\
 &\quad + \frac{(s'(G)-k)(s'(G)-k+1)}{2}.
 \end{aligned}$$

Note that under $\sum_{i=a}^b$ we understand 0 if $a > b$. If we do the division of the summands not between k and $k+1$, but between $k-1$ and k , we can obtain the same result for $k = s'(G) + 1$ as well.

For the vertex-chromatic sum, Kokosiński and Kwarciány provided a lower bound, edge-coloring version of which can be obtained if we put $k = 1$ in the lemma above. Lecat, Lucet, and Li [7] obtained a result on $\Sigma(G)$, which, if translated into edge-coloring terms, is similar to the result of the lemma above. They claim that the best estimate is obtained when $k = \left\lfloor \frac{|E(G)| - s'(G)}{\alpha'(G) - 1} \right\rfloor + 1$.

Since $\alpha'(G) \leq \left\lfloor \frac{|V(G)|}{2} \right\rfloor$ and $s'(G) \geq \Delta(G)$, we can obtain the following corollary as well:

Corollary 2. For a graph G and any integer k that satisfies $0 \leq k \leq \Delta(G) + 1$, we have:

$$\sum'(G) \geq k \left(|E(G)| - \frac{k-1}{2} \left\lfloor \frac{|V(G)|}{2} \right\rfloor \right) + \frac{(\Delta(G)-k)(\Delta(G)-k+1)}{2}.$$

Note that here the upper bound of k is set to $\Delta(G) + 1$ instead of $s'(G) + 1$ since the inequality $(s'(G)-k)(s'(G)-k+1) \geq (\Delta(G)-k)(\Delta(G)-k+1)$ is not true for $\Delta(G) + 1 < k \leq s'(G) + 1$.

Upper Bounds

Now we proceed to the upper bounds.

Lemma 3. For any graph G ,

$$\sum'(G) \leq \frac{1}{2} \sum_{v \in V(G)} d_G^2(v).$$

Proof. We use the fact $\sum'(G) = \sum(L(G))$ here. Thomassen et al. also showed [4] that $\sum(G) \leq |V(G)| + |E(G)|$. By placing $L(G)$ instead of G , we get

$$\begin{aligned}
 \sum(L(G)) &\leq |V(L(G))| + |E(L(G))| \\
 &= |E(G)| + \sum_{v \in V(G)} \frac{d_G(v)(d_G(v)-1)}{2} = \\
 &= |E(G)| + \frac{1}{2} \sum_{v \in V(G)} d_G^2(v) - \frac{1}{2} \sum_{v \in V(G)} d_G(v) = \frac{1}{2} \sum_{v \in V(G)} d_G^2(v).
 \end{aligned}$$

There is an upper bound obtained by Thomassen that states that $\Sigma'(G) \leq 3|E(G)|$ if G has no isolated vertices. This means that if there are no adjacent vertices of degree 1 in G , then $\Sigma'(G) \leq \frac{3}{2} \sum_{v \in V(G)} d_G(v)(d_G(v) - 1)$. Let us compare this upper bound with the result of the lemma above. We see that $\frac{3}{2} \sum_{v \in V(G)} d_G(v)(d_G(v) - 1) - \frac{1}{2} \sum_{v \in V(G)} d_G^2(v) = \sum_{uv \in E(G)} d_G(v)(d_G(v) - \frac{3}{2}) = \sum_{uv \in E(G)} (d_G(u) + d_G(v) - 3)$. Since for each edge $uv \in E(G)$, at least one from u and v has a degree greater than 1, this sum is always non-negative. This gives us that the upper bound of the lemma is more optimal.

We prove one more upper bound.

Lemma 4. For any graph G ,

$$\Sigma'(G) \leq \frac{1}{2} |E(G)| (\chi'(G) + 1).$$

Proof. Consider any proper edge-coloring of G that uses $\chi'(G)$ colors. Denote by c_i the number of edges colored with i . Obviously, we can reorder the colors so that $c_1 \geq c_2 \geq \dots \geq c_{\chi'(G)}$.

We use the Chebyshev's sum inequality, which says that if we have the numbers $a_1 \geq a_2 \geq \dots \geq a_n$ and $b_1 \leq b_2 \leq \dots \leq b_n$, then

$$\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_k b_k \leq \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_k \right) \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n b_k \right).$$

If we replace n with $\chi'(G)$, a_i ($i = 1, 2, \dots, n$) with c_i , and b_i with $1, 2, \dots, n$, we get

$$\frac{1}{\chi'(G)} \sum_{k=1}^{\chi'(G)} k c_k \leq \left(\frac{1}{\chi'(G)} \sum_{k=1}^{\chi'(G)} c_k \right) \left(\frac{1}{\chi'(G)} \sum_{k=1}^{\chi'(G)} k \right).$$

$\Sigma'(G) \leq \sum_{k=1}^{\chi'(G)} k c_k$, and the number $\sum_{k=1}^{\chi'(G)} c_k$ is exactly $|E(G)|$. Placing those values in the inequality above, we get

$$\Sigma'(G) \leq |E(G)| \frac{1}{\chi'(G)} \frac{\chi'(G)(\chi'(G) + 1)}{2} = \frac{|E(G)|(\chi'(G) + 1)}{2}.$$

Note that there is also a similar upper bound for vertex-chromatic sums, which is briefly described in [14]. Giaro and Kubale [13] mention an upper bound for bipartite graphs that is always less optimal than the result in the lemma above, since $\chi'(G) = \Delta(G)$ for bipartite graphs.

Since $\chi'(G) \leq \Delta(G) + 1$, we can write also the following:

Corollary 3. For any graph G ,

$$\Sigma'(G) \leq \frac{1}{2} |E(G)| (\Delta(G) + 2).$$

By collecting the results from the lemmas, we formulate a theorem about the lower and upper bounds of any graph:

Theorem 1.

For any graph G , we have

$$\sum'(G) \geq \left\lceil \frac{1}{4} \sum_{v \in V(G)} d_G^2(v) + \frac{1}{2} |E(G)| \right\rceil, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sum'(G) \geq k \left(|E(G)| - \frac{\alpha'(G)(k-1)}{2} \right) \\ + \frac{(s'(G) - k)(s'(G) - k + 1)}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

$(0 \leq k \leq s'(G) + 1),$

$$\sum'(G) \leq \frac{1}{2} \sum_{v \in V(G)} d_G^2(v), \quad (3)$$

$$\sum'(G) \leq \frac{1}{2} |E(G)| (\chi'(G) + 1). \quad (4)$$

In order to show the efficiency of each lower and upper bound, we provide:

1. Graphs, for which the bound is tight,
2. Graphs, for which the bound is better than the other bound.

First, consider r -regular graphs of order n , where $r \geq 2$. In this case, from (1), we obtain $\sum'(G) \geq \frac{nr(r+1)}{4}$, and (4) gives us that $\sum'(G) \leq \frac{nr(s'(G)+1)}{4}$. For class 1 graphs among such graphs (which are known to exist), we have $s'(G) = r$. Hence, the two bounds coincide, yielding a tight bound in both cases.

Now consider the star graphs. If we put $k = 0$ in the bound (2), we get $\sum'(G) \geq \frac{s'(G)(s'(G)+1)}{2}$, and the bound (4) gives us that $\sum'(G) \leq \frac{|E(G)|(\chi'(G)+1)}{2}$. It is not hard to see that the bounds again coincide, yielding tight bounds for (2) and (4).

Note that for star graphs the bound (1) gives $\sum'(G) \geq \left\lceil \frac{(|V(G)|-1)(|V(G)|+2)}{4} \right\rceil$, so for $|V(G)| > 3$, it becomes not more optimal than the bound (2).

To show that the second bound is not always more optimal than the first one, let us consider the graph provided in the Figure 1. (1) gives us the bound of 11 while (2) gives us the maximum bound 10 when $k = 2$.

From the upper bounds, (4) is more efficient than (3) in r -regular graphs with $r > 2$:

$$\frac{nr(\chi'(G) + 1)}{4} \leq \frac{nr(r + 2)}{4} = \frac{nr^2}{4} + \frac{nr}{2} < \frac{nr^2}{4} + \frac{nr}{2} = \frac{nr^2}{2}.$$

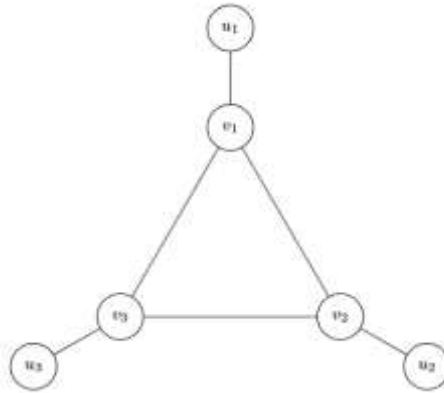


Figure 1: Graph with an edge-chromatic sum of 12

(3) is more efficient than (4) for example in wheel graphs (Figure 2): (3) gives the bound $\frac{n^2+9n}{2}$, while (4) gives $n(\chi'(W_{n+1}) + 1) \geq n(n+1)$. Obviously, for larger n , the upper bound (3) is more efficient.

Thereby, we showed, that for each bound there are graphs, where it is more optimal, and in some cases, they reach the exact value of the edge-chromatic sum.

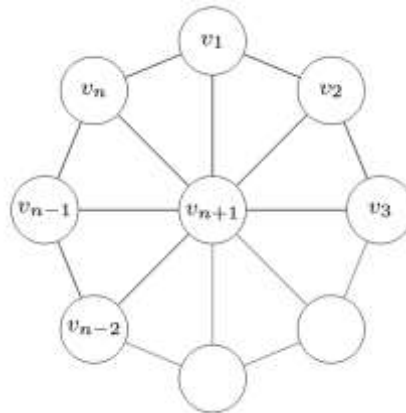


Figure 2: A wheel graph W_{n+1}

REFERENCES

1. *Supowit K.* Finding a maximum planar subset of nets in a channel // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 6 (1), 1987. PP. 93–94.
2. *Kubiccka E. and Schwenk A.* An introduction to chromatic sums // Proceedings of the 17th Annual ACM Computer Science Conference. 1989. PP. 39–45.

3. Bar-Noy A., Bellare M., Halldorsson M.M., Shachnai H., and Tamir T. On chromatic sums and distributed resource allocation // "Information and Computation", 140, 1998. PP. 183-202.
4. Thomassen C., Erdős P., Alavi Y., Malde P.J., and Schwenk A.J. Tight bounds on the chromatic sum of a connected graph // Journal of Graph Theory, 13, 1989. PP. 353-357.
5. Kokosiński Z. and Kwarciany, K. On Sum Coloring of Graphs with Parallel Genetic Algorithms // "Adaptive and Natural Computing Algorithms", 2007. PP. 211-219.
6. Jin Y., Hamiez J.-P., and Hao J.-K. Algorithms for the minimum sum coloring problem: a review // "Artificial Intelligence Review", 47(3), 2016. PP. 367-394.
7. Lecat C., Lucet C., and Li C.-M. New Lower Bound for the Minimum Sum Coloring Problem // Thirty-First AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2017. PP. 853-859.
8. Salavatipour M.R. On sum coloring of graphs // Discrete Applied Mathematics, 127, 2003. PP. 477-488.
9. Petrosyan P.A. and Kamalian R.R. On sum edge-coloring of regular, bipartite graphs and split graphs // Discrete Applied Mathematics, 165, 2014. PP. 263-269.
10. Petrosyan P.A. Sequential edge-coloring on the subset of vertices of almost regular graphs // <https://arxiv.org/abs/1401.0836>, 2014.
11. West D.B. Introduction to Graph Theory, 2001.
12. Hajiabolhassan H., Mehrabadi M. and Tusserkani R. Minimal coloring and strength of graphs // Discrete Mathematics, 215(1), 2000. PP. 265-270.
13. Giaro K. and Kubale M. Edge-chromatic sum of trees and bounded cyclicity graphs // Information Processing Letters, 75, 2000. PP. 65-69.
14. Hajiabolhassan H., Mehrabadi M.L., and Tusserkani R. Tabular graphs and chromatic sum // "Discrete Mathematics", 304(1), 2005. PP. 11-22.

ОБЩИЕ ОЦЕНКИ ДЛЯ РЕБЕРНО-ХРОМАТИЧЕСКИХ СУММ ГРАФОВ

Г. Микаелян

Ереванский государственный университет

АННОТАЦИЯ

Правильная реберная раскраска графа – это отображение его ребер на натуральные числа таким образом, что смежные ребра получают разные числа (цвета). Реберно-хроматическая сумма графа – это минимальная сумма цветов на всех ребрах среди всевозможных правильных реберных раскрасок. Цель данной работы – найти нижние и верхние оценки для параметра реберно-хроматической суммы графов. Получены две нижние и две верхние оценки, которые сравнены с некоторыми существующими результатами. Также показано, что обе оценки эффективны для определенных классов графов, и для каждой границы существуют графы, для которых она более эффективна, чем другая.

Ключевые слова: реберно-хроматическая сумма, правильная реберная раскраска.

DOI 10.24412/1829-0450-fm-2026-1-28-35
УДК 519.688

Поступила: 09.03.2026г.
Сдана на рецензию: 10.03.2026г.
Подписана к печати: 19.03.2026г.

VISUAL RELATIVE LOCALIZATION FOR GNSS-FREE CONTROL OF UAV SWARM

V. Sahakyan

*Russian-Armenian University
vardan.sahakyan@student.rau.am*

ABSTRACT

Operation of UAV formations in GNSS-denied environments requires alternative sources of position information that can be integrated directly into the flight-control loop. This paper presents a leader–follower approach in which GNSS is replaced for follower UAVs using visual relative localization computed onboard a single leader platform. The leader estimates the relative three-dimensional positions of follower UAVs using monocular vision and injects these estimates into the followers' PX4 flight controllers through the external-vision interface. The followers rely exclusively on the injected relative position measurements for state estimation and closed-loop position control, without using GNSS or performing onboard localization. The proposed system is fully onboard, requires no external infrastructure, and is implemented using an open-source ROS 2–PX4 software stack. The approach is evaluated in a multi-UAV software-in-the-loop simulation under GNSS-denied conditions. Two experiments are conducted: nominal formation flight to assess steady-state behavior, and a leader velocity sweep to analyze the effect of increased dynamic excitation on tracking accuracy. Results show stable follower position control using relative localization alone, with bounded error across the tested operating range, demonstrating the feasibility of visual relative localization as a practical GNSS replacement for leader–follower UAV formations.

Keywords: GNSS-denied navigation; UAV formations; leader–follower architecture; visual relative localization; PX4 autopilot

Introduction

Most multi-UAV formation and swarm systems implicitly assume the availability of absolute position estimates on each vehicle, typically provided by GNSS. In practice, this assumption strongly constrains deployability: follower UAVs must carry full navigation sensors, run onboard localization pipelines, and maintain global consistency even when their role in the formation is purely reactive. This paper adopts the opposite perspective and asks a simpler question: can GNSS be removed entirely from follower UAVs while preserving closed-loop position control using a standard autopilot?

We address this question using a leader–follower architecture in which all sensing and relative localization are performed onboard a single leader UAV. The leader estimates the three-dimensional relative positions of follower vehicles using monocular vision and onboard state information, and streams these estimates directly into the followers’ flight controllers through the PX4 [1] external-vision interface. The followers do not perform localization, do not fuse GNSS, and rely exclusively on the injected relative position measurements for state estimation and control.

Unlike approaches that require custom controllers or SLAM-based backends [2],[3], the proposed method integrates relative localization directly into the standard PX4 estimation and position-control loop. This allows follower UAVs to operate using unmodified autopilot control laws while replacing GNSS with externally provided relative pose information. The system is evaluated in multi-UAV software-in-the-loop simulation under GNSS-denied conditions, using nominal formation flight and a leader velocity sweep to characterize stability and dynamic limits.

Related Work

GNSS-denied multi-UAV operation has been addressed through visual-inertial SLAM, cooperative localization, and relative sensing–based formation control. Collaborative SLAM frameworks enable multiple UAVs to estimate globally consistent trajectories by sharing visual and inertial information, often using centralized or distributed backends [3],[4]. These systems typically require onboard perception and estimation on each vehicle and rely on persistent environmental features. Relative localization approaches avoid global mapping by estimating inter-UAV geometry directly. Vision-based flocking and formation-control systems use bearing-only or relative pose measurements to maintain coordinated motion under GNSS-denied conditions, either in decentralized configurations [5][6] or hierarchical leader–follower architectures [7]. Such methods reduce sensing requirements but commonly employ custom control laws or operate outside standard autopilot estimation pipelines.

Leader–follower visual collaboration has also been demonstrated in indoor and outdoor environments, where a sensing-capable leader provides relative position information to follower UAVs [8]. These systems illustrate the feasibility of relative localization–based coordination while differing in sensing assumptions, estimator design, and control integration.

Proposed Method

A. System Overview

The proposed method replaces GNSS-based positioning for follower UAVs using visual relative localization computed onboard a single leader UAV. The leader performs all sensing and estimation, while followers operate using standard PX4

estimation and position control driven exclusively by externally provided relative position measurements. No global localization, mapping, or GNSS fusion is performed on follower vehicles.

The system follows a centralized leader–follower structure in which relative pose estimates are generated on the leader and streamed to the followers at a fixed rate. These estimates are injected directly into the follower flight controllers via PX4’s external-vision interface and treated as the primary position source by the onboard estimator.

B. Visual Relative Localization

The leader UAV is equipped with a downward-facing monocular camera and onboard state estimation. Follower UAVs are detected in the image plane using a lightweight YOLO-based object detector with an explicit UAV target class [9] and tracked over time using the Norfair multi-object tracking framework [10], producing pixel-space measurements for each visible follower. Each detection is back-projected into a three-dimensional direction vector using known camera intrinsics.

Depth is recovered using the vertical separation between the leader and follower, obtained from onboard altitude measurements. The resulting three-dimensional relative position is first expressed in the camera frame and then transformed into the leader body frame using calibrated camera-to-body extrinsics. Finally, the relative position is rotated into the local NED frame using the leader’s attitude estimate. The output of this process is a relative position vector expressed in the same coordinate frame used by the flight controller.

C. GNSS Replacement via External Vision Injection

Relative position estimates computed on the leader are transmitted to each follower UAV over a wireless link and injected into the PX4 estimator using the `vehicle_visual_odometry[11]` interface. Each message contains the relative position expressed in the local NED frame, a synchronized timestamp, and appropriate validity flags.

On the follower UAVs, GNSS fusion is disabled and the PX4 estimator is configured to rely solely on externally provided position updates. The injected relative positions are treated as ground-truth measurements for state estimation, enabling closed-loop position control without GNSS or onboard localization. Followers use their standard PX4 position controller to track commanded setpoints based on the estimated state.

D. Control loop integration

The proposed method integrates relative localization directly into the standard PX4 estimation–control loop. No modifications to the autopilot controller structure are required. As the leader moves, updated relative position estimates are continuously streamed to the followers, allowing them to maintain their assigned relative positions using unmodified PX4 position control laws. This tight coupling

between perception, estimation, and control enables stable closed-loop operation while replacing GNSS entirely for follower UAVs.

Results

A. Simulation environment

The proposed method was evaluated in a multi-UAV software-in-the-loop simulation using PX4 SITL[12], Gazebo[13], and ROS 2 [14]. Each UAV operated in an isolated namespace with an independent PX4 instance and uXRCE-DDS[15] session. One UAV acted as the leader and five as followers. GNSS fusion was disabled on all followers, which relied exclusively on externally injected relative position estimates for state estimation and control. Gazebo served as the global time reference to ensure synchronized operation across vehicles. All experiments were conducted under GNSS-denied conditions.

B. Metrics

Follower performance was evaluated using two complementary metrics.

The primary metric is the root-mean-square (RMS) relative position error, defined as the Euclidean distance between the estimated relative position of each follower and its desired relative offset with respect to the leader, expressed in the leader-aligned NED frame. RMS error was computed over the full trajectory for each follower and averaged across all followers.

To characterize deformation of the formation under dynamic excitation, formation distortion (FD) was also evaluated. Formation distortion measures deviations in pairwise distances between follower UAVs relative to their initial spacing, averaged over all follower pairs and over time. This metric captures changes in formation shape that may not be reflected by leader–follower error alone, particularly under high-speed motion.

C. Results Nominal operation

In the nominal experiment (Figure 1), the leader UAV executed two representative motion patterns at a constant speed of 3 m/s:

- (i) a straight-line trajectory of 50 m length, and
- (ii) a planar figure-eight trajectory composed of smooth circular arcs.

The follower UAVs maintained predefined circular, V-shaped, and line formation geometries, with fixed relative offsets with respect to the leader, using only externally provided localization. For both trajectories, the formation remained stable throughout the flight, with RMS relative position errors on the order of 1–2 m and low formation distortion. Error distributions remained bounded, and no estimator instability or oscillatory behavior was observed, indicating that the injected relative position estimates were sufficient to support sustained closed-loop position control without GNSS under nominal motion.

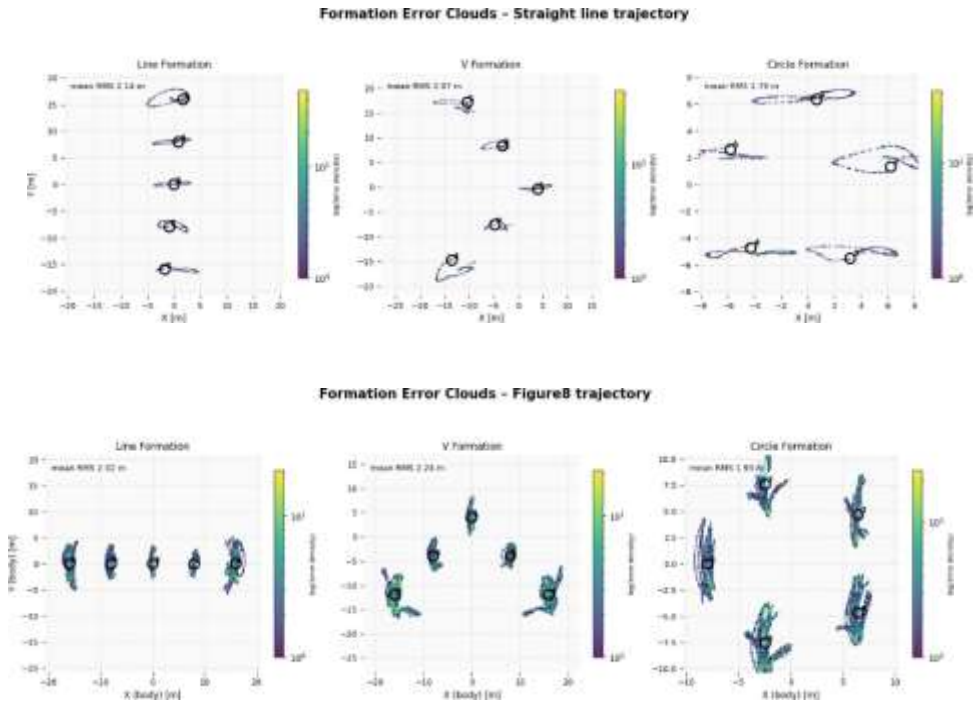


Figure 1. Error-cloud plots for the straight-line, figure-8, and circular missions, shown for line, V, and circle formations. Each subplot depicts the instantaneous follower relative-position error in the leader's body frame, sampled at 30 Hz. The horizontal and vertical axes correspond to the leader body-frame x and y directions.

Velocity Sweep

To evaluate dynamic limits, the leader executed the straight-line trajectory while its speed was increased from 2 m/s to 7 m/s in 1 m/s increments, with the follower UAVs maintaining a circular formation. Followers maintained the same relative configuration throughout all runs (Figure 2). At low to moderate speeds (2–4 m/s), both RMS relative error and formation distortion remained close to nominal values, indicating near-rigid formation behavior. As the leader speed exceeded approximately 5 m/s, the RMS error increased gradually, and the formation distortion became more pronounced, elongating along the direction of motion. Despite this degradation, the system remained stable across the entire tested range, with no divergence or loss of control observed. The observed performance degradation reflects bandwidth and latency limitations of the perception–estimation–control pipeline rather than instability of the control loop.

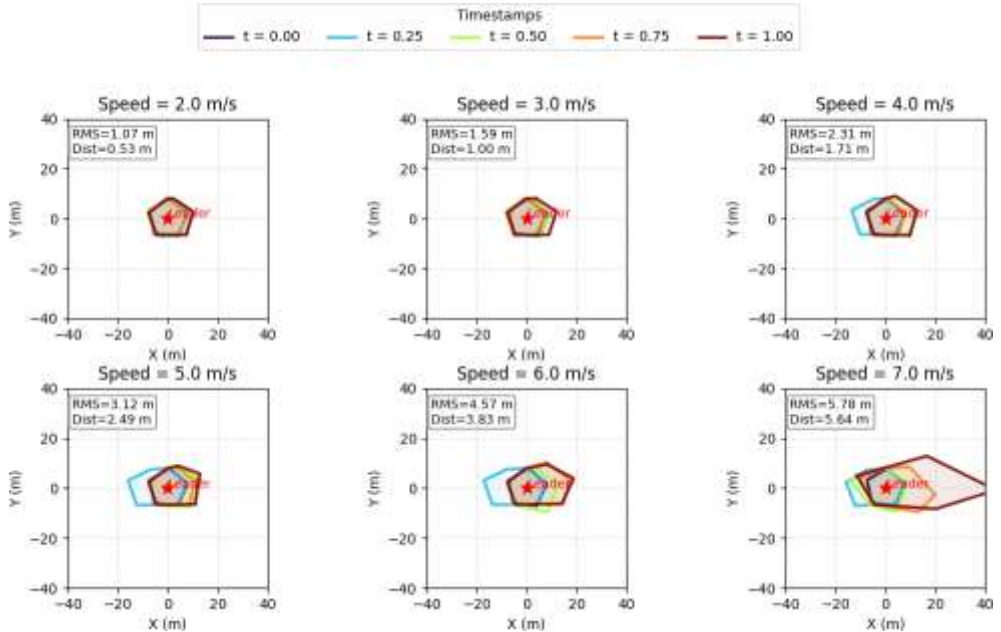


Figure 2. Leader and follower trajectories for straight-line missions at speeds of 2, 3, 4, 5, 6, and 7 m/s, shown in the leader's camera frame. Each subplot depicts follower positions at normalized timestamps $t=\{0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00\}$ for the circular formation. The reported values in each subplot are the time-averaged RMS drift and formation-distortion metrics computed over the full trajectory.

Conclusion

This paper presented a practical GNSS replacement strategy for follower UAVs in a leader–follower formation, based on visual relative localization and tight integration with the PX4 flight-control stack. Relative position estimates computed onboard a single leader UAV were injected directly into follower estimators via the PX4 external-vision interface, enabling closed-loop position control without GNSS or onboard localization on follower vehicles.

Simulation results under GNSS-denied conditions demonstrated stable follower control during nominal motion and predictable, gradual performance degradation as leader speed increased. The velocity-sweep experiments highlighted the dynamic limits of the perception–estimation–control pipeline while confirming the absence of instability or divergence across the tested operating range. Together, these results indicate that visual relative localization can serve as a viable positioning source for follower UAVs when integrated directly into standard autopilot estimation and control loops.

Future work will focus on experimental validation in real-world multi-UAV flights, improved robustness to visual occlusions, and extension toward more distributed or redundant architectures that relax the single-leader assumption.

Acknowledgment: This work was supported by the Science Committee of RA (Research project No 23AA-1B007).

REFERENCES

1. PX4 Autopilot Development Team, “PX4 Flight Stack Architecture,” PX4 User Guide. [Online]. Available: <https://docs.px4.io/main/en/concept/architecture#flight-stack>
2. Xie J., He X., Mao J., Zhang L., & Hu X. (2022). C2VIR-SLAM: centralized collaborative visual-inertial-range simultaneous localization and mapping. *Drones*, 6 (11), 312.
3. Xu H., Liu P., Chen X., & Shen S. (2024). $\$ D^{\wedge}\{2\} \$$ SLAM: Decentralized and Distributed Collaborative Visual-Inertial SLAM System for Aerial Swarm. *IEEE Transactions on Robotics*, 40, 3445–3464.
4. Patel M., Karrer M., Bänninger P. & Chli M. (2023). Covins-g: A generic back-end for collaborative visual-inertial slam. *arXiv preprint arXiv:2301.07147*.
5. Schilling F., Schiano F., Floreano D. Vision-Based Drone Flocking in Outdoor Environments,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, no. 2. PP. 2953–2960, 2021.
6. Horyna J., Krátký V., Pritzl V., Băča T., Ferrante E. & Saska M. (2024). Fast swarming of uavs in gnss-denied feature-poor environments without explicit communication. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 9 (6), 5284–5291.
7. Ma L., Meng D., Huang X., & Zhao S. (2023). Vision-based formation control for an outdoor UAV swarm with hierarchical architecture. *IEEE Access*, 11, 75134–75151.
8. Evangeliou N. et al., Visual Collaboration Leader-Follower UAV-Formation for Indoor Exploration, *Frontiers in Robotics and AI*, 2022, DOI: 10.3389/frobt.2021.777535.
9. Kjelberg M. Drone Detector, Hugging Face, 2023. [Online]. Available: <https://huggingface.co/marie-kjelberg/drone-detector>. Accessed: Jan. 23, 2026.
10. Tryolabs, “Norfair: Lightweight Python library for real-time multi-object tracking,” GitHub repository, 2023. [Online]. Available: <https://github.com/tryolabs/norfair>. Accessed: Jan. 23, 2026.
11. PX4 Development Team. VehicleOdometry (uORB message). https://docs.px4.io/main/en/msg_docs/VehicleOdometry
12. PX4 Development Team. PX4 Autopilot User Guide – Simulation (SITL). <https://docs.px4.io/main/en/simulation/>
13. Open Source Robotics Foundation (OSRF). . <https://gazebosim.org/>
14. ROS 2: <https://docs.ros.org/en/rolling/index.html>
15. PX4 uXRCE-DDS Middleware: <https://docs.px4.io/main/en/middleware/micrortps.html>

ВИЗУАЛЬНАЯ ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДЛЯ GNSS-НЕЗАВИСИМОГО УПРАВЛЕНИЯ РОЕМ БПЛА

В. Саакян

Российско-Армянский университет

АННОТАЦИЯ

Эксплуатация формаций беспилотных летательных аппаратов в условиях отсутствия GNSS требует альтернативных источников по-

зиционной информации, которые могут быть напрямую интегрированы в контур управления полетом. В данной работе представлен подход типа «лидер-ведомый», в котором GNSS для ведомых БПЛА заменяется визуальной относительной локализацией, вычисляемой на борту одного ведущего аппарата. Ведущий БПЛА оценивает относительные трехмерные положения ведомых аппаратов с использованием монокулярного зрения и передает эти оценки в полетные контроллеры PX4 ведомых через интерфейс внешнего зрения. Ведомые БПЛА используют исключительно внедряемые относительные измерения положения для оценки состояния и замкнутого управления положением, без применения GNSS и без выполнения бортовой локализации.

Предложенная система полностью реализована на борту летательных аппаратов, не требует внешней инфраструктуры и основана на открытом программном стеке ROS 2-PX4. Подход был оценен в симуляторе с несколькими БПЛА (software-in-the-loop) в условиях отсутствия GNSS. Проведены два эксперимента: номинальный полет в формации для оценки установившегося режима работы и варьирование скорости ведущего БПЛА для анализа влияния возросшей динамической нагрузки на точность слежения. Полученные результаты демонстрируют устойчивое управление положением ведомых БПЛА на основе одной лишь относительной локализации, с ограниченной ошибкой во всем исследованном диапазоне режимов, что подтверждает практическую применимость визуальной относительной локализации в качестве замены GNSS для формаций БПЛА с архитектурой «лидер-ведомый».

Ключевые слова: навигация без GNSS; формации БПЛА; архитектура «лидер-ведомый»; визуальная относительная локализация; автопилот PX4.

DOI 10.24412/1829-0450-fm-2026-1-36-43
УДК 519.688

Поступила: 09.03.2026г.
Сдана на рецензию: 10.03.2026г.
Подписана к печати: 19.03.2026г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРСИИ КОМПИЛЯТОРА SOLIDITY ИЗ ИСХОДНОГО КОДА

Т.С. Авагян, О.М. Мовсисян, А.К. Асланян

Российско-Армянский университет

tigran.avagyan@rau.am, hovhannes.movsisyan@rau.am, hayk.aslanyan@rau.am
ORCID: 0009-0007-0924-641X, 0000-0002-7582-7948, 0000-0002-7320-4835

АННОТАЦИЯ

В данной работе представлен метод и реализован инструмент для нахождения версии компилятора из исходного кода для языка “Solidity”. Подход реализован на основе регулярных выражений, который обеспечивает производительность в сравнении с другими методами работающими на базе абстрактного синтаксического дерева. Экспериментальная оценка на реальных проектах продемонстрировала его эффективность. Производительность разработанного инструмента в 6 раз быстрее существующего альтернативного решения; точность достигает 100% (против 88,41%), а полнота – 98,77% (против 79,04%).

Ключевые слова: блокчейн, анализ кода, компиляторы.

Введение

Языки программирования подвергаются множественным модификациям, прежде чем достигнут своего окончательного вида. Дело в том, что, чаще всего, сами разработчики не уверены, каким должен быть окончательный язык: его синтаксис, детали имплементации и т.д. Язык может измениться очень радикально от версии к версии, поэтому возникает сильная необходимость компилирования именно конкретной версией компилятора. Поэтому при ранних версиях языка принято как-то обозначать версию, на котором надо будет компилировать программу.

Одним из таких языков является основной язык для разработки смарт-контрактов [1] на блокчейне “Ethereum” [2] – “Solidity” [3]. Версия языка может обозначаться как конкретно, так и интервалами, что на первый взгляд упрощает нахождение версии, давая широкий выбор, но на самом деле – это не так. Проблема в том, что интервалов может быть много (н.п. `pragma solidity >0.8.0 <0.9.0 >=0.8.7`), и выбранная версия компилятора должна находиться в каждом из них.

Простейшим решением может быть перебор всех версий и компиляция файла с каждым из них. Если будет ошибка компиляции, мы пропустим эту

версию, иначе – мы отметим, что эта версия удовлетворяет требованиям. Основная проблема этого решения – производительность. При компиляции больших файлах компиляция может длиться слишком долго.

Постановка задачи

Цель: разработать систему, которая находит все версии компилятора для данного файла, соответствующие всем требованиям.

Для достижения цели были выполнены следующие задачи:

1. Сделать предобработку кода, облегчив нахождение *специальных инструкций*.
2. Найти в коде специальные инструкции, ограничивающие версию компилятора.
3. Парсить найденные инструкции и найти ограничения в *канонической форме*.
4. Найти пересечение всех ограничений.

В постановке задачи использовались выражения *специальная инструкция* и *каноническая форма*.

В “Solidity” версия компилятора задается с помощью директив «version pragma» [3]. Это инструкции, которые могут в себе содержать как саму версию, так и некоторый интервал, либо несколько интервалов. Их в коде может быть несколько, и они могут находиться как в начале кода (как принято), так и в середине либо в конце. Их будем называть *специальными инструкциями*.

Множество всех версий “Solidity” обозначим через V . *Канонической формой* будем называть специальную форму представления множества видов: $>v$, $>=v$, $<v$, $<=v$, $=v$, $\wedge v$, $\sim v$ где v – версия “Solidity”, которую можно представить в виде вектора (v_1, v_2, v_3) множества \mathbb{N}_0^3 . Для версий можем определить отношение порядка $<$ данным образом:

$$v < u \Leftrightarrow \begin{cases} v_1 < u_1 \\ v_1 = u_1 \wedge v_2 < u_2 \\ v_1 = u_1 \wedge v_2 = u_2 \wedge v_3 < u_3 \end{cases}$$

Ниже перечислены формальные представления множеств заданных канонической формой:

$$\forall v \in V$$

$$\begin{aligned} >v &\equiv \{u \in V \mid u > v\} \\ >=v &\equiv \{u \in V \mid u \geq v\} \\ <v &\equiv \{u \in V \mid u < v\} \\ <=v &\equiv \{u \in V \mid u \leq v\} \\ =v &\equiv \{v\} \\ \wedge v &\equiv \{u \in V \mid u_1 = v_1 \wedge u_2 = v_2 \wedge u_3 \geq v_3\} \end{aligned}$$

$$\sim v \equiv \quad \wedge v$$

(так как для всех элементов V первая компонента равна нулю).

Предобработка

Ввод: код на языке “Solidity”;

Вывод: предобработанный код.

Разработанный алгоритм работает на основе регулярных выражений [4], однако, если специальная инструкция будет закомментирована, мы не сможем различить ее от незакомментированные специальной инструкции. Появляется необходимость удалить все комментарии из кода перед основным алгоритмом. В этом и заключается предобработка.

Комментарии в “Solidity” бывают двух видов: однострочные и многострочные. Однострочные комментарии начинаются на // и заканчиваются, как только заканчивается строка. Многострочные комментарии начинаются с /* и заканчиваются на */, при этом каждый символ не может находиться одновременно в однострочном и многострочном комментариях.

В реализации алгоритма алгоритм обходит все символы в коде, игнорируя содержимое строковых литералов, если он еще не находится в многострочном комментарии. Если алгоритм вошел в многострочный комментарий, он игнорирует все символы, пока не выйдет из него. Если он вошел в однострочный комментарий, он сразу переходит на новую строку.

В итоге, у нас есть код, в котором удалены все комментарии.

Нахождение специальных инструкций

Ввод: предобработанный код;

Вывод: специальные инструкции.

Специальные инструкции имеют вид

`pragma solidity L,`

где L – выражение, вида k_1, k_2, \dots, k_n , где k_i – множество, заданное в каноническом виде. Сложность нахождения *специальных инструкций* заключается в том, что *специальные инструкции* могут встречаться в любом месте в коде, и надо учитывать все специальные инструкции. Более того, выражение может не быть именно в таком формате, имея в виду, что между токенами могут быть пробелы, горизонтальные табуляции и переводы строки.

Как было отмечено выше, алгоритм реализован с помощью регулярных выражений.

Поиск регулярного выражения осуществлялся итеративно, на каждом шаге усложняя выражение, тем самым приводя его к нужному нам выражению.

Разделим *специальную инструкцию* на три части: *пролог*, *главная часть* и *эпилог*. *Пролог специальной инструкции* – это часть, в котором присутствует только фрагмент `pragma solidity`

Имея ввиду все пробелы, горизонтальные табуляции и символы перевода строки построим регулярное выражение только для этой части.

$^{\wedge}\backslash s^* \text{pragma} \backslash s + \text{solidity} \backslash s^*$

Эпилог состоит из одного символа `;`. Она нужна, чтобы компилятор знал, когда заканчивается инструкция. Для него регулярное выражение очевидно.

Главной частью является часть содержащая версии. Рассмотрим упрощенный вариант *главной части*, когда во фрагменте одна *каноническая форма*. Между оператором и операндом могут быть пробелы и другие похожие символы, версия может быть задана как с помощью трех чисел рассмотренных ранее, так и с помощью двух чисел, опуская последний 0. Принимая в расчет то, что между точками могут быть пробелы и похожие символы, в результате получаем регулярное выражение следующего вида:

$(\backslash \wedge | > | = | < | < = | = | \sim)? [\backslash s?]^* \backslash d + \backslash s^* \backslash . \backslash s^* \backslash d + (\backslash s^* \backslash . \backslash s^* \backslash d +)? \backslash s^*$

Так как в *главной части* количество *канонических форм* строго больше нуля, получим:

$(\backslash \wedge | > | = | < | < = | = | \sim)? [\backslash s?]^* \backslash d + \backslash s^* \backslash . \backslash s^* \backslash d + (\backslash s^* \backslash . \backslash s^* \backslash d +)? \backslash s^* +$

Также, *главная часть* может быть заключена в " или в ". Так как нахождение версии имеет смысл только с файлами, которые компилируются, мы можем, вместо того, чтобы проверить для каждого типа кавычек, проверить начало и конец на наличие кавычек любого типа.

$[""]?(((\backslash \wedge | > | = | < | < = | = | \sim)? [\backslash s?]^* \backslash d + \backslash s^* \backslash . \backslash s^* \backslash d + (\backslash s^* \backslash . \backslash s^* \backslash d +)? \backslash s^* +))[""]?$

Если кавычки не будут соответствовать друг другу, ни с какой версией компилятора код не скомпилируется, поэтому тот код будет нам не интересен. В итоге получили регулярное выражение, вида:

$^{\wedge} \backslash s^* \text{pragma} \backslash s + \text{solidity} \backslash s^* [""]?(((\backslash \wedge | > | = | < | < = | = | \sim)? [\backslash s?]^* \backslash d + \backslash s^* \backslash . \backslash s^* \backslash d + (\backslash s^* \backslash . \backslash s^* \backslash d +)? \backslash s^* +))[""]?;$

Данное регулярное выражение позволяет находить все специальные инструкции.

Парсинг специальных инструкций

Ввод: *специальные инструкции*;

Вывод: *канонические формы*.

Имея все *специальные инструкции*, можно извлечь главные части. В итоге, мы имеем главные части всех *специальных инструкций*. С помощью регулярного выражения

$(\backslash \wedge | > | = | < | < = | = | \sim)? [\backslash s?]^* (\backslash d +) \backslash s^* \backslash . \backslash s^* (\backslash d +) (\backslash s^* \backslash . \backslash s^* (\backslash d +))?$

получим ограничения в следующем виде

(оператор, (v1, v2, v3)) ∈ {^, >, >=, <, <=, =, ~} × ℕ₀³

Если (v1, v2, v3) обозначим через v, а оператор присоединим к v слева, получим *каноническую форму*.

Пересечение канонических форм

Ввод: *канонические формы*;

Вывод: множество версий, удовлетворяющие требованиям всех *канонических форм*

Так как множество \mathbf{V} невелико (менее ста элементов), мы можем сделать перебор по всем его элементам и проверить, находится ли элемент в пересечении множеств данных каноническими формами. Причина представления множеств в *канонической форме* удобно тем, что мы можем не хранить эти множества как набор элементов, а хранить как пару (оператор, версия), что будет занимать значительно меньше памяти. Возникает вопрос, как именно проверить, находится ли какая-то версия в множестве, заданной *канонической формой*. Поскольку канонические формы определяются с помощью неравенств, для заданной версии достаточно проверить условия, определяющие форму, чтобы установить принадлежность к множеству, индуцированному данной формой. После перебора всех версий из \mathbf{V} , как результат, получим множество версий, удовлетворяющие требованиям всех *канонических форм*.

Оптимизации

Если допустить, что существует хотя бы одна версия, при которой файл успешно компилируется, можно применить следующую оптимизацию. Можно искать в канонических формах множество, вида $=v$ либо, если сокращенно: v (если такой имеется), можно сразу же закончить поиск, дав в качестве результата версию v .

Для следующей оптимизации, надо тщательнее исследовать каноническую форму. Обозначим через $\mathbf{V}_<$ отсортированный набор, содержащий все элементы множества \mathbf{V} . Пронумеруем элементы набора $\mathbf{V}_<$.

$$\mathbf{V}_< = (v^1, v^2, \dots, v^n)$$

Рассмотрим *форму* вида $=v$ (v).

$$=v = \{v\} = (<=v) \cap (>=v)$$

Заменим все *формы* вида $\sim v$ на $\wedge v$. Рассмотрим *форму* вида $\wedge v$. По определению:

$$\begin{aligned} \wedge v &= \{u \in \mathbf{V} \mid u_1 = v_1 \wedge u_2 = v_2 \wedge u_3 > v_3\} = \\ &= \{u \in \mathbf{V} \mid u \geq v\} \cap \{u \in \mathbf{V} \mid u < (v_1+1, 0, 0)\} \end{aligned}$$

$$v' \equiv (v_1+1, 0, 0)$$

$$\wedge v = \{u \in \mathbf{V} \mid u \geq v\} \cap \{u \in \mathbf{V} \mid u < v'\} = (>=v) \cap (<v')$$

Если $v' \notin \mathbf{V}$, то $<v' = \mathbf{V}$.

$$>=v \subset \mathbf{V} \Rightarrow (>=v) \cap \mathbf{V} = (>=v) \Rightarrow \wedge v = (>=v)$$

Если $v' \in \mathbf{V}$, то $\wedge v = (>=v) \cap (<v')$.

В итоге, мы разложили *формы* $\wedge v$ и $=v$ при помощи остальных *форм*. Все *формы* вида $\wedge v$ заменим на соответствующие ему эквивалентные *формы*. При

первом случае $\wedge v$ заменяется на $\geq v$, во втором же случае заменим $\wedge v$ на две формы, которые мы все равно пересечем в последней фазе. Аналогично поступим и с формами вида $=v$. Мы можем и дальше упрощать формы и прийти только к формам вида $\geq v$ и $\leq v$, но в этом нет необходимости.

В результате, получаются только формы, видов $\geq v$, $>v$, $\leq v$, $<v$. Первые два назовем каноническими формами типа 1 ($\kappa 1$), а последние два – каноническими формами типа 2 ($\kappa 2$). Добавим к каноническим формам формы $\geq v^1$ и $\leq v^n$. Они никак не изменяют результат пересечения. Теперь мы имеем хотя бы одну $\kappa 1$ и хотя бы одну $\kappa 2$. Пересечение всех канонических форм можно вычислить, взяв пересечение всех $\kappa 1$ и всех $\kappa 2$ и вычислить пересечение полученных двух множеств. При пересечении двух $\kappa 1$, получим $\kappa 1$, и при пересечении двух $\kappa 2$, получим $\kappa 2$. Обобщив результат, пересечение всех $\kappa 1$ дает $\kappa 1$, а пересечение всех $\kappa 2$ дает $\kappa 2$. Таким образом, для нахождения результата надо найти пересечение одной $\kappa 1$ с одной $\kappa 2$, что даст либо пустое множество, либо множество с одним элементом, либо множество элементов, которое мы отсортируем и полученный набор обозначим через R .

$$\exists i \exists j R = (v^i, v^{i+1}, \dots, v^j)$$

Получили, что для результата, нужно найти i и j . Для нахождения i можно перебирать элементы $V_<$ начиная слева. Первая версия, удовлетворяющая всем условиям будет версией под номером i . Затем сделаем бинарный поиск для нахождения j следующим образом: обозначим i через l_0 , а n через r_0 . Возьмем середину отрезка $[l_0; r_0]$, обозначим через k_1 и проверим, удовлетворяет ли она всем требованиям специальных инструкций. Если удовлетворяет, возьмем в качестве l_1 число k_1 , а в качестве r_1 число r_0 . Если не удовлетворяет, возьмем в качестве l_1 число l_0 , а в качестве r_1 число k_1 . Сделаем то же самое для отрезка $[l_1; r_1]$. В итоге, после конечного числа шагов, получим l_p и r_p числа, которые равны между собой.

$$l_p = r_p = j$$

Результаты

Разработанный инструмент был протестирован на наборе из 895 смарт-контрактов на языке “Solidity”. Для сравнения мы взяли инструмент solcix [6], который дает возможность решить нашу проблему. Результаты представлены в Табл. 1. В первом столбце написаны имена инструментов (первый инструмент – наш), второй столбец показывает количество найденных и проверенных версий, третий столбец показывает количество файлов, для которых инструмент выдал ошибку при анализе, а последний столбец показывает время, потраченное на анализ всех файлов. Наш инструмент работает на 6.3 раза быстрее, так как работает на основе регулярных выражений. Для 11-и файлов никакой из инструментов не смог найти версию.

Таблица 1. Результаты сравнения.

Инструмент	Количество правильно найденных версий	Количество ложно-положительных результатов	Время
SolVerScan	884	0	17.8 с.
solcix	641	84	112.0 с.

Заключение

В данной статье предложен и реализован метод определения версии компилятора “Solidity” по исходному коду. Показано, что использование регулярных выражений позволяет существенно повысить производительность по сравнению с подходами, основанными на анализе абстрактного синтаксического дерева.

Экспериментальная оценка на реальных проектах подтвердила высокую точность и быстродействие предложенного метода. Реализация инструмента доступна в открытом доступе под лицензией MIT [7], что делает его применимым для практического использования и дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сабо Н.* Smart Contracts: Building Blocks for Digital Markets // “Extropy”. 1996. № 16. PP. 18–23.
2. *Хилденбрандт Е., Саксена М., Чжу С., Родригес Н., Дауан П., Гут Д., Мур Б., Чжан И., Парк Д., Штефанеску А., Рошу Г.* KEVM: A Complete Semantics of the Ethereum Virtual Machine // Proceedings of the 31st IEEE Computer Security Foundations Symposium (CSF 2018). IEEE Computer Society, 2018. СС.204–217. DOI: 10.1109/CSF.2018.00022.
3. *Закжревский Я.* Towards Verification of Ethereum Smart Contracts: A Formalization of Core of Solidity / Ред. Р. Пискач, П. Руммер. В сборнике Verified Software. Theories, Tools and Experiments: 10th Int’l Conf., VSTTE 2018, Revised Selected Papers. Сер.: Lecture Notes in Computer Science, т.11294. Cham: Springer, 2018. СС.229–247. DOI: 10.1007/978-3-030-03592-1_13.
4. *Кампэну К., Саломаа К., Ю.Ш.* A formal study of practical regular expressions // “International Journal of Foundations of Computer Science”. Т. 14, № 6, 2003. СС. 1007–1018. DOI:10.1142/S012905410300214X.
5. *Ахо А.В., Лэм М.С., Сети Р., Ульман Д.Д.* Compilers: Principles, Techniques, and Tools / 2-е изд. Boston: Addison-Wesley, 2006. СС. 108–120.
6. *Solratic.* solcix: The ultimate Solidity compiler version management tool and Python package / GitHub repository. URL: <https://github.com/Solratic/solcix> (дата обращения: 14.01.2026).
7. *cast-tech.* Solverscan / GitHub repository. URL: <https://github.com/cast-tech/solverscan> (дата обращения: 16.01.2026).

SOLIDITY COMPILER VERSION DETECTION FROM SOURCE CODE

T. Avagyan, H. Movsisyan, H. Aslanyan
Russian-Armenian University

ABSTRACT

This paper presents a method and an implementation of a tool, that finds the compiler version from the source code for the language Solidity. The approach uses regular expressions on its base, which ensures high performance compared to other methods based on the abstract syntax tree. Experimental evaluation on real-life projects has demonstrated its effectiveness, and the comparison with an existing tool has demonstrated its performance and accuracy. The developed tool demonstrates a performance increase of six times over the existing alternative solution; its precision reaches 100% (compared to 88.41%), while its recall is 98.77% (compared to 79.04%).

Keywords: blockchain, code analysis, compilers.

DOI 10.24412/1829-0450-fm-2026-1-44-50
УДК 519.688

Поступила: 09.03.2026г.
Сдана на рецензию: 10.03.2026г.
Подписана к печати: 19.03.2026г.

AUTOMATED DETECTION AND ANALYSIS OF PROJECTILE IMPACTS USING COMPUTER VISION

V. Melkonyan, M. Smbatyan, A. Sardaryan

Russian-Armenian University

*vahagn.melkonyan@student.rau.am, meri.smbatyan@student.rau.am,
armen.sardaryan@rau.am*

ABSTRACT

This paper presents a software system for the automated real-time detection, stabilization, and analysis of projectile impacts in video sequences. The system utilizes a model to identify the region of interest automatically. Impact events are identified through a multi-method approach that combines the inter-frame transformation magnitudes, background subtraction, and contour analysis within a defined mask. The system outputs annotated frames marking the precise impact location and calculates its coordinates relative to the center of the target.

Keywords: Impact Detection, Computer Vision, Optical Flow, Video Stabilization, Background Subtraction

Introduction

Accurately detecting and localizing impact points in video sequences is an important task in various domains, including sports analytics, defense applications. Manually reviewing footage to identify and localize these events is time-consuming and prone to human error.

Traditional motion detection algorithms, while simple and efficient, are often prone to false positives caused by minor camera movements, lighting changes, or irrelevant background motion. More advanced systems use high-speed cameras or additional sensors to achieve higher precision, but such setups are costly and less accessible. With the growing availability of high-resolution video and advances in computer vision, it is now possible to achieve similar accuracy using standard cameras combined with intelligent image processing techniques.

Existing approaches often rely on background subtraction [1, 2], but these can be sensitive to dynamic backgrounds. More recent methods incorporate deep learning for object detection [3, 4], but real-time performance and accurate localization remain challenges.

While many existing approaches focus on detecting impacts on a fixed target (e.g., a gong), real-world scenarios frequently involve shots that miss the target and hit the surrounding ground. These ground impacts carry valuable information –

for example, for adjusting aim, evaluating projectile spread, or tracking shot trajectories.

Related Work

The detection and localization of impact events in video intersect several key areas of computer vision, including motion detection, video stabilization, background modeling, and object detection. Traditional methods, such as frame differencing and background subtraction (e.g., Gaussian Mixture Models [1] or running averages [2]), are computationally efficient but often fail in real-world conditions due to camera motion, dynamic backgrounds, and illumination changes.

Video stabilization has been widely studied to mitigate the effects of camera shake. Classical feature-based methods, including those based on the Kanade-Lucas-Tomasi (KLT) optical flow [5] or SIFT/SURF feature matching [6], estimate inter-frame transformations to compensate for unwanted camera shake. More recent stabilization approaches leverage homography estimation and motion smoothing [7], enabling more robust separation between scene motion and camera-induced motion. However, these methods are typically applied offline and are not optimized for real-time impact detection tasks.

For object localization, deep learning-based methods such as Faster R-CNN [3], YOLO [4], and more recently, Segment Anything Model (SAM) [8], have achieved high accuracy and generalization, but are not well suited for transient, small-scale events such as projectile impacts. Recent variants such as Fast

Segment Anything Model (FastSAM) [9] offer real-time segmentation performance, making them suitable for target identification in streaming video.

Some approaches focus exclusively on detecting impacts on a fixed target, such as gongs or metallic plates, using vibration analysis or frame differencing. However, these methods are limited to hits within a predefined area and fail to detect ground impacts, which can be critical for applications such as ballistic calibration or trajectory reconstruction.

In summary, existing techniques either rely on motion cues that are sensitive to environmental factors or on object detectors not optimized for short, transient events. The proposed system addresses this gap by combining real-time target segmentation, feature-based stabilization, and a multi-method detection strategy to robustly detect and localize both target and ground impacts.

Proposed Method

The proposed system is designed as a modular pipeline that integrates several computer vision techniques to achieve robust, real-time impact detection. The overall architecture, depicted in Figure 1, consists of five main stages: (1) video input and preprocessing, (2) target identification and initialization,

(3) frame stabilization and motion compensation, (4) multi-method impact detection and analysis, and (5) data fusion and output. The following subsections provide a detailed exposition of each stage.

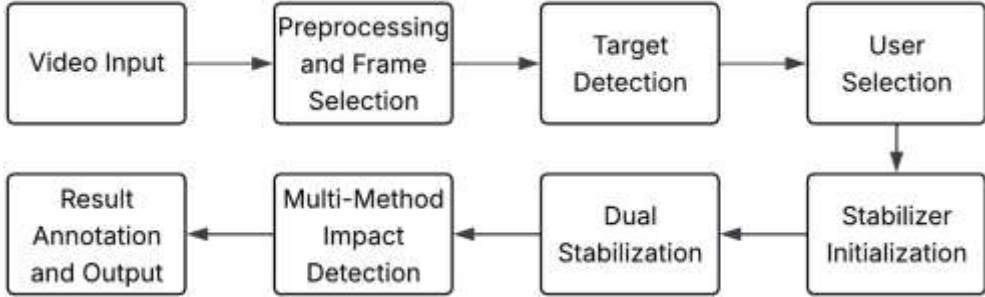


Figure 1. System Architecture Diagram.

1. Video Input and Processing

The process begins by capturing the video stream from a file or a live camera feed. Each frame is resized to a fixed resolution (e.g., 1280×720) to standardize processing and reduce computational load. A preprocessing step removes black areas caused by the phone being attached to binoculars, ensuring that only the relevant visual region is analyzed and reducing unnecessary computation.

2. Target Identification and Initialization

Accurate and stable target identification is critical for reliable impact localization. This is achieved by using the FastSAM segmentation model, which provides high accuracy and real-time performance.

From the segmented output, candidate regions are extracted based on confidence scores and presented to the user for manual confirmation. This user-in-the-loop initialization ensures precise target selection (e.g., the gong), which is used to initialize the stabilization module.

3. Frame Stabilization and Motion Compensation

To separate true impact motion from camera shake, the system applies feature-based video stabilization. After the target is selected, keypoints are extracted from the reference frame (frame after target selecting) and tracked across subsequent frames using the Kanade–Lucas–Tomasi (KLT) optical flow algorithm. For each keypoint $p_j = (x_j, y_j)^T$ in the reference frame, the corresponding $p'_j = (x'_j, y'_j)^T$ in the current frame is found. The matched feature pairs are used to estimate a partial affine transformation matrix:

$$p'_j \approx A_t \begin{bmatrix} p_j \\ 1 \end{bmatrix}, A_t = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & t_x \\ a_{21} & a_{22} & t_y \end{bmatrix}.$$

Each frame is warped using the inverse of this transformation to produce a stabilized video stream in which the target remains stationary. The magnitude of motion is computed as:

$$\Delta t = \sqrt{t_x^2 + t_y^2},$$

and stored for subsequent impact detection.

4. Multi-Method Impact Detection and Analysis

Impact detection combines two complementary methods for reliability.

Method 1: Transformation Magnitude-Based Detection. This method acts as a high-confidence trigger. A projectile impact typically induces a sudden, sharp impulse to the target, causing a momentary, large displacement. This manifests as a significant peak in the magnitude of the stabilization transformation. When this magnitude exceeds a dynamically adaptive threshold, it is interpreted as a primary indicator of a hit event, initiating the relevant frames saving process.

Method 2: Contour Analysis within a Region of Interest (ROI). This method provides precise impact localization. A dynamic background model B_t of the target is maintained using a running average:

$$B_t = (1 - \alpha) \cdot B_{t-1} + \alpha \cdot I_t^{ROI},$$

where I_t is the original frame, $B_0 = I_0^{ROI}$, and $0 \leq \alpha \leq 1$. This background model blends information from each new frame with the existing background. This allows the model to adapt to slow, natural changes (such as lighting variations) while ignoring short, sudden disturbances. The absolute difference between the current target ROI and this background model is computed and thresholded to create a binary mask of changes.

Contours extracted from this mask are filtered to remove edge noise and combined using a custom merging algorithm.

The algorithm works by computing the distance between contour centroids. For two contours with centroids at positions $c_i = (x_i, y_i)$ and $c_j = (x_j, y_j)$, the distance is calculated as:

$$d(i, j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}.$$

Contours with centroids closer than a distance threshold, $d(i, j) \tau_{dist}$, where τ_{dist} is a predefined distance threshold, are joined if their merged convex hull area is within an acceptable range.

Remaining contours are evaluated for circularity, defined as:

$$C = \frac{4\pi A_c}{p_c^2},$$

where A_c and P_c are the contour's area and perimeter. This metric ranges from 0 (complex shape) to 1 (perfect circle). Contours with $C > \tau_{cric}$ are classified as valid impact points, where τ_{cric} is a predefined circularity threshold. This ensures only circular patterns characteristic of projectile impacts are selected.

5. Data Fusion and Output

When a hit is confirmed by either method, the system synthesizes the data. The impact coordinates are transformed back to the original frame's coordinate system using the inverse of the stabilization transformation matrix. As we have 2×3 affine transformation matrix A_t is first converted to a 3×3 homogeneous matrix:

$$A_{hom} = \begin{bmatrix} A & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & t_x \\ a_{21} & a_{22} & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

The inverse transformation A_{hom}^{-1} is computed, and the impact point $p_{stab} = (x, y, 1)^T$ in homogeneous coordinates is transformed as:

$$p_{original} = A_{hom}^{-1} \cdot p_{stab}.$$

The system then calculates the normalized offset relative to the target's center, providing metrics such as "X: 0.125 LEFT", which indicates the hit was located 12.5% of the target's width to the left of center. The final annotated frame displays the target boundary, detected impact point, and offset information, as shown in Figure 2.

Results

To evaluate the performance of the proposed system, we compiled a dataset consisting of 71 videos, each approximately two minutes long. The dataset includes a range of scenarios: videos with no impacts, only gong hits, only off-target (ground) impacts, and those containing both. This diversity allows for a comprehensive evaluation of both gong and non-gong impact detection.

After processing the entire dataset, the system produced a total of 227 annotated detections, each of which was manually reviewed and classified. The distribution of detections is summarized in Table 1.

Table 1. Results of system testing.

<i>Category</i>	<i>Description</i>	<i>Count</i>
Correct off-target detections	Hits not on the gong but correctly localized	159
Correct gong detections	Hits on the gong, correctly localized	26
Gong detections with localization error	Hits on the gong, detected but with incorrect impact location	7
Off-target detections with localization error	Hits not on the gong, detected but with incorrect impact location	10
Unrelated / ambiguous detections	False detections caused by camera shake or duplicate detections from multiple methods	25

In total, 185 out of 227 detections (81.5%) were correctly localized, demonstrating the system's ability to accurately identify both gong and off-target impacts. The remaining 11% of ambiguous detections were mainly caused by strong camera motion or simultaneous activation of multiple detection methods. These cases suggest directions for future improvement, such as implementing temporal filtering and decision fusion strategies to further enhance system stability and precision.



(a)



(b)

Figure 2. Representative examples of successful impact detection: (a) On-target hit accurately detected and measured on the gong surface; (b) Off-target hit correctly localized in the background.

Conclusion

In conclusion, the implemented system demonstrates a robust and effective approach to automated impact detection. This system has practical applications in automated scoring systems, scientific experiments, and security monitoring.

REFERENCES

1. Stauffer Ch. and Eric W., Grimson L. Adaptive background mixture models for real-time tracking." Proceedings. 1999 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition (Cat. No PR00149). Vol. 2. IEEE, 1999.
2. Kaew TraKul Pong, Pakorn, and Bowden R. An improved adaptive background mixture model for real-time tracking with shadow detection." Video-based surveillance systems: Computer vision and distributed processing. Boston, MA: Springer US, 2002. 135–144.
3. Ren, Shaoqing, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence 39.6 (2016): 1137– 1149.
4. Redmon J. et al. You only look once: Unified, real-time object detection." Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016.
5. Lucas, Bruce D. and Takeo Kanade. An iterative image registration technique with an application to stereo vision // IJCAI'81: 7th international joint conference on Artificial intelligence. Vol. 2. 1981.
6. Lowe, David G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints // International journal of computer vision 60.2 (2004): 91–110.
7. Matsushita, Yasuyuki, et al. Full-frame video stabilization. 2005 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition (CVPR'05). Vol. 1. IEEE, 2005.
8. Kirillov Al. et al. Segment anything. Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision. 2023.
9. Zhao, Xu et al. Fast segment anything. arXiv preprint arXiv:2306.12156 (2023).

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ И АНАЛИЗ
ВОЗДЕЙСТВИЙ СНАРЯДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ**

В. Мелконян, М. Смбалян, А. Сардарян

Российско-Армянский университет

vahagn.melkonyan@student.rau.am, meri.smbatyan@student.rau.am,

armen.sardaryan@rau.am

АННОТАЦИЯ

В данной работе представлена программная система для автоматического обнаружения, стабилизации и анализа попаданий снарядов в видеопоследовательностях в режиме реального времени. Система автоматически определяет область интереса с помощью модели сегментации. События попаданий выявляются с помощью многоуровневого подхода, который сочетает анализ межкадровых преобразований, вычитание фона и контурный анализ в заданной маске. На выходе система формирует аннотированные кадры с точным указанием места попадания и вычисляет его координаты относительно центра цели.

Ключевые слова: обнаружение ударов, компьютерное зрение, оптический поток, стабилизация видео, вычитание фона.

DOI 10.24412/1829-0450-fm-2026-1-51-60
УДК 519.688

Поступила: 09.03.2026.
Сдана на рецензию: 10.03.2026г.
Подписана к печати: 27.03.2026г.

A SOFTWARE-DEFINED RADIO APPROACH TO LoRA-BASED COMMUNICATION FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

H. Tumanyan¹, L. Kirakosyan²

¹Yerevan State University

²Russian-Armenian University

hovhannes.tumanyan1@edu.y-su.am, kirakosyan.lilia@student.rau.am

ABSTRACT

As Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) continue to expand their operational reach, the critical need for highly resilient, long-distance data links has driven significant interest in Low Power Wide Area Network (LPWAN) technologies. LoRa modules are commonly used for UAV telemetry; however, they typically operate on a fixed frequency channel, which makes the communication link vulnerable to jamming, whereas SDR-based systems can mitigate this issue by changing the operating frequency. SDRs offer incredible flexibility, allowing us to dynamically change frequencies to avoid active RF jamming and create custom, wide-band channels that standard chips cannot support. Using BladeRF 2.0 micro xA4 SDRs and custom GNU Radio processing, we built a continuous, Frequency Division Duplex (FDD) LoRa link. By artificially expanding the bandwidth to 3 MHz and placing the uplink and downlink on entirely separate frequency bands, the system effortlessly handles the data flow required by Ground Control Stations. This design preserves the ruggedness of LoRa's Chirp Spread Spectrum while eliminating traditional bottlenecks, easily supporting MAVLink v2 encryption overhead, and entirely removing turnaround delays. Real-world flight tests with a Raspberry Pi 5 companion computer confirmed the system's stability, maintaining a flawless, low-latency connection at 400 meters using only the SDR's unamplified native power

Keywords: Software-Defined Radio (SDR), Unmanned Aerial Vehicles (UAV), LoRa, Telemetry, BladeRF.

I. Introduction

The rapid proliferation and expanding operational scope of autonomous UAVs necessitate highly reliable, low-latency, and long-range communication architectures. For small-to-medium autonomous platforms operating on frameworks like ArduPilot [1] and PX4 [2], the MAVLink protocol [3] has emerged as the ubiquitous standard for bidirectional telemetry, parameter synchronization, and command-and-control (C2) data streams [1]. As UAV applications transition from localized line-of-sight flights to complex, autonomous Beyond Visual Line of Sight

(BVLOS) operations such as infrastructure inspection, search and rescue, and large-scale agricultural surveying the demands placed on aerial communication networks have scaled exponentially.

To achieve BVLOS operations, Long Range (LoRa) [4] modulation is frequently evaluated by the aerospace and robotics communities. LoRa relies on a proprietary physical layer utilising Chirp Spread Spectrum (CSS) [5]. By sweeping a continuous frequency chirp across a defined bandwidth, CSS spreads the narrowband signal over a wider spectrum, yielding a processing gain that permits signal demodulation near or below the ambient noise floor [5]. Consequently, LoRa exhibits exceptionally high resilience to multipath fading, and narrowband interference – all of which are critical factors in dynamic aerial environments. Furthermore, LoRa's low power requirements make it highly suitable for constrained aerial platforms where power budgets are strictly allocated.

This study presents an SDR-based architecture designed to circumvent these hardware limitations. By migrating the LoRa physical layer into software via GNU Radio [6] and deploying it on BladeRF 2.0 micro xA4 platforms [7], the system attains dynamic frequency agility to evade active RF jamming, and the operational bandwidth is artificially extended to an unprecedented 3 MHz. Furthermore, a continuous FDD link is established by utilizing highly asymmetric frequency bands. This approach provides a high-capacity, zero-turnaround-latency alternative to conventional LPWAN setups, successfully bridging the gap between high-throughput local telemetry and robust long-range CSS links. The system is empirically validated through active flight testing utilizing a Raspberry Pi 5 [8] companion computer to handle the dense baseband processing requirements.

II. Related Work and Telemetry Paradigms

To fully contextualise the necessity of an SDR-driven LoRa link, it is crucial to evaluate the existing concepts of UAV telemetry and the academic efforts to reverse-engineer LPWAN protocols. The industry currently relies on a fragmented ecosystem of RF solutions, none of which perfectly address the dual requirements of high bandwidth and long-range resilience.

A. Existing UAV Telemetry Architectures

Current UAV telemetry systems exhibit specific performance trade-offs when applied to the bidirectional demands of the MAVLink protocol:

- **Narrowband FSK Radios:** Operating primarily in the 433 MHz or 915 MHz ISM bands [9], traditional SiK-based [10] radios utilise basic Frequency Shift Keying (FSK) [12] and Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) [9]. While theoretical air data rates can reach 250 kbps, practical long-range implementations often restrict this to 64 kbps or lower to maintain link integrity and sensitivity. Crucially, the TDM switching latency

heavily chokes the link during bidirectional communications, adding tens of milliseconds of latency to every request-response transaction [1], [10].

- **Broadband Line-of-Sight (Wi-Fi):** Standard 2.4 GHz or 5 GHz IEEE 802.11 telemetry [17] provides exceptional throughput (exceeding 10 Mbps) but experiences rapid free-space path loss and extreme susceptibility to urban RF interference. Lacking the signal processing gain of CSS, these systems are strictly limited to short-range, line-of-sight (LOS) operations, typically failing beyond a few hundred meters in cluttered environments.
- **Control-Centric LPWANs (ExpressLRS/Crossfire)** [12]: Modern open-source control links [12] utilise Semtech LoRa chips to achieve incredibly low latency and extended range. However, their physical layer scheduling prioritizes unidirectional RC control packets. The bi-directional telemetry bandwidth is intentionally constrained (often limited to < 2 kbps) to ensure primary C2 command delivery, rendering them unsuitable for full MAVLink parameter synchronization, map polygon transfers, or cryptographic key exchanges.
- **Cellular LTE/5G Telemetry:** While cellular networks offer theoretical infinite range [13], they are subject to variable latency, cellular tower hand-off drops, and altitude-based signal degradation (as cellular antennas are down-tilted toward the ground). Furthermore, they require reliance on third-party infrastructure, making them unsuitable for remote, off-grid robotic operations.

B. SDR Implementations of LoRa

The foundation of software-defined LoRa communication was significantly advanced by the reverse engineering and implementation efforts of the academic community. Tapparel et al. [14] and the EPFL Telecommunications Circuits Laboratory [15] successfully developed `gr-lora_sdr` [16], a fully functional open-source GNU Radio implementation of the LoRa transceiver. Their extensive signal analysis provided the essential building blocks for generating, interleaving, and decoding LoRa modulated signals purely in software, allowing researchers to bypass the rigid constraints of commercial Semtech silicon [15]. While SDR platforms have been extensively utilised in UAV research for spectrum monitoring, anti-jamming applications, and custom waveform design, the application of SDRs to artificially expand the LoRa physical layer for high-throughput, full-duplex robotic telemetry remains largely unexplored in contemporary literature. Previous SDR implementations of LoRa have predominantly focused on IoT gateway emulation or security auditing at standard bandwidths (125 kHz). This paper proposes a UAV telemetry system that integrates the LoRa protocol with SDR, building upon existing implementations to enable flexible and robust telemetry communication.

III. Theoretical Background: MAVLink and CSS

To mathematically justify the necessity of an expanded 3 MHz bandwidth, the payload structure of the target protocol and the physical layer equations governing CSS must be analyzed.

A. MAVLink Protocol Structure and Demands

MAVLink is a highly efficient, lightweight serialisation protocol optimized for constrained radio links. The introduction of MAVLink v2 significantly increased packet overhead to support modern features. A standard MAVLink v2 frame consists of a 10-byte header (comprising a Magic Marker 0xFD, Payload Length, Incompatibility Flags, Compatibility Flags, Sequence number, System ID, Component ID, and a 24-bit Message ID), followed by up to 255 bytes of payload, a 2-byte CRC-16-CCITT, and an optional 13-byte cryptographic signature [3]. In standard flight scenarios, flight controllers stream critical state data (e.g., ATTITUDE, GLOBAL_POSITION_INT, VFR_HUD) at frequencies between 4 Hz and 50 Hz. This establishes a baseline continuous bandwidth requirement of approximately 3.5 to 4.5 kbytes/s (28 to 36 kbps).

While standard telemetry links support this baseline, the protocol's point-to-point mechanisms for mission uploads and parameter synchronization create massive burst-throughput requirements. During a standard GCS connection sequence, the request for the complete parameter tree (often containing over 1,200 configuration parameters) can instantaneously saturate narrowband links, causing buffer overflows and packet loss in half-duplex radios [1].

B. LoRa CSS Mathematical Foundations

LoRa utilizes frequency chirps to represent symbols [5]. The instantaneous frequency of a LoRa chirp $f(t)$ varies linearly over time T_{sym} :

$$f(t) = f_0 + \frac{BW}{T_{sym}}t$$

Where f_0 is the starting frequency, BW is the bandwidth, and T_{sym} is the symbol duration. The relationship between the symbol rate (R_s), Bandwidth (BW), and Spreading Factor (SF) is defined mathematically as:

$$R_s = \frac{BW}{2^{SF}}$$

The resulting physical bit rate (R_b), incorporating the Forward Error Correction Coding Rate (CR), is calculated as:

$$R_b = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \cdot CR$$

In commercial hardware, the maximum bandwidth is 500 kHz. At $SF=7$ and $CR=4/5$, the maximum theoretical bit rate of commercial LoRa is constrained to approximately 21.9 kbps [18]. This rate is mathematically insufficient to process uncompressed MAVLink streams alongside concurrent parameter downloads, firmly establishing the necessity for an SDR-driven approach for multi-megahertz bandwidth expansion.

IV. System Architecture and Hardware architecture

To address the latency and bandwidth limitations outlined above, we propose a comprehensive SDR-based hardware and software architecture designed for aerial integration. To mitigate the latency of conventional TDD, our system implements a Dual-Frequency FDD architecture using BladeRF SDRs. The GCS transmits on an uplink of 383.75 MHz and receives on a 637.9 MHz downlink, while the UAV operates inversely. The large frequency separation between the uplink and downlink allows the BladeRF's internal RF front-end filters to strongly suppress leakage from the local transmitter, enabling full-duplex operation with minimal mutual interference. The physical backbone relies on the BladeRF's Analog Devices AD9361 transceiver, which easily supports the arbitrary baseband sampling rates up to 61.44 MSPS required for this architecture [7].

On the UAV side, the BladeRF is paired with a Raspberry Pi 5 single-board computer [8], which serves as the MAVLink companion computer. Processing a 6 Msps, 3 MHz wide Chirp Spread Spectrum signal in GNU Radio requires substantial real-time CPU cycles for FFT[18] peak detection, phase tracking, and deinterleaving. A 6 Msps complex64 stream equates to a continuous 48 MB/s data transfer over the USB bus [18].

V. GNU Radio Software Implementation

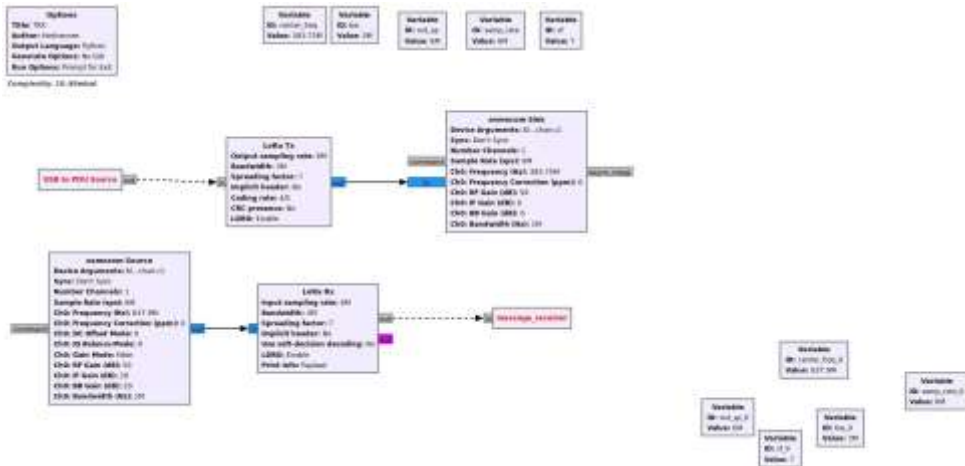
The software bridging the SDR hardware and the MAVLink protocol utilizes a highly optimized GNU Radio Companion (GRC) flowgraph built upon the modified `gr-lora_sdr` module.

A. Specific PHY Parameterisation

To attain the necessary throughput for MAVLink while maximising the processing gain of CSS, the variables within the GNU Radio flowgraph are defined meticulously:

- **Sample Rate:** 6 Msps. This baseband sampling rate interfaces the GNU Radio software with the Osmocom hardware blocks [20], safely satisfying the Nyquist-Shannon sampling [21] theorem for the 3 MHz signal width by maintaining an oversampling ratio of 2.
- **Bandwidth:** 3 MHz. By expanding the software LoRa bandwidth to 3 MHz, the chirp slope steepens drastically, proportionally increasing the theoretical maximum bit rate to accommodate GCS parameter downloads.

- **Spreading Factor: SF7.** As the lowest standard spreading factor, SF7 minimizes the time- on-air per symbol, prioritizing extremely low-latency delivery for joystick operations over extended range limits.
- **Coding Rate: 4/5.** Appending one parity bit per four data bits supplies adequate forward error correction (FEC) utilising Hamming (8,4) codes [11], suitable for aerial multipath environments without excessively bloating the packet overhead.
- **Low Data Rate Optimization (LDRO):** Enabled. Although conventionally utilized only for high-SF configurations where symbol times exceed 16.38 ms, enabling LDRO assists the SDR receiver algorithms in maintaining symbol timing stability. It effectively halves the number of bits encoded per symbol, increasing resilience against fractional frequency offsets and clock drifts between the independent, un-synchronized oscillators of the two BladeRF boards.
- **Implicit Header & CRC:** The LoRa physical header is configured to explicitly declare payload length and coding rate. The physical layer CRC is explicitly disabled, as the upper MAVLink protocol natively implements highly robust CRC-16-CCITT cryptographic hashes per packet, making PHY-layer CRCs redundant.



B. Transmit Chain Processing

The transmit chain begins with a custom GNU Radio Source block that parses the asynchronous serial or UDP stream originating from QGroundControl or the Flight Controller. The block buffers incoming bytes until a complete MAVLink packet is formed, constructing discrete GNU Radio Protocol Data Units (PDUs) [6] to prevent fragmentation across the air interface.

The PDUs are passed to the LoRa TX Block, which executes a rigorous sequence of physical layer transformations [5]:

1. **Data Whitening:** An XOR cipher utilizing a predefined linear-feedback shift register (LFSR) sequence randomizes the data to ensure uniform spectral energy distribution and prevent DC biasing in the RF amplifier chain [15].
2. **Hamming Encoding and Interleaving:** The 4/5 FEC is applied, and the resulting bits are diagonally interleaved across a defined matrix size to protect against burst errors caused by momentary RF fading or impulsive noise [15].
3. **Gray Indexing:** The interleaved bits are mapped to integer values representing the starting frequency offset of each individual chirp [15].
4. **Chirp Synthesis:** The baseband complex I/Q samples are mathematically generated, synthesizing a signal that sweeps from -1.5 MHz to 1.5 MHz relative to the center frequency at exactly 6 Msps.

C. Receive Chain Processing

The incoming 6 Msps baseband stream from the Osmocom Source is fed into the computationally intensive LoRa RX block. The process involves:

1. **Preamble Synchronization:** The receiver detects a defined sequence of identical up-chirps.
2. **De-Chirping:** The synchronised signal is multiplied by a locally generated down-chirp. This mathematical operation transforms the frequency-swept LoRa symbols into discrete, stationary frequency tones.
3. **FFT Peak Detection:** FFT [18] is applied to the de-chirped signal. The frequency bin containing the maximum spectral energy peak directly correlates to the Gray-indexed integer of the transmitted symbol [18].
4. **De-Interleaving and Decoding:** The integer is converted back to bits, de-interleaved across the matrix, de-whitened via the LFSR, and parsed back into a MAVLink PDU. A custom sink block finally routes the raw byte stream to the local serial/UDP socket connected to the GCS.

VI. Experimental Flight Validation

To explicitly validate the theoretical capabilities and stability of the proposed SDR-based LoRa architecture, comprehensive real-world flight tests were conducted in an open-field environment.

A. Experimental Setup and Hardware Integration

The UAV test platform was equipped with a standard open-source flight controller Pixhawk 6c [19] utilising the MAVLink v2 protocol [3]. The flight controller's telemetry UART port was bridged via a USB-to-Serial adapter to the Raspberry Pi 5 companion computer. The Raspberry Pi 5 executed the GNU Radio `gr-lora_sdr` flowgraph, generating the data stream and pushing it to the onboard BladeRF 2.0 micro SDR. The Ground Station node consisted of a laptop running

QGroundControl[2]. The laptop was tethered to a secondary BladeRF 2.0 micro via USB 3.0. Both SDR nodes utilised basic, unamplified omnidirectional antennas tuned appropriately for the 383.75 MHz and 637.9 MHz frequencies. The antennas were mounted vertically to ensure matching polarisation during level flight.

B. Flight Test Performance and Observations

During dynamic, multi-axis flight operations, including rapid altitude changes, banking maneuvers, and high-speed passes, the system successfully initialised and maintained a continuous, bidirectional FDD MAVLink connection between the UAV and QGroundControl up to a radial distance of approximately **400 meters**. Across the evaluated operational conditions, the implemented FDD link demonstrated stable communication performance. The GCS received continuous telemetry updates at a sustained rate without packet interruption. Furthermore, command-and-control messages and full parameter tree refresh operations were handled concurrently with minimal end-to-end latency.

C. Analysis of the 400-Meter Unamplified Range

The effective range of 400 meters observed during this unamplified test aligns precisely with the expected empirical performance profile of the utilised hardware. When establishing a wideband 3 MHz channel, the thermal noise floor ($10\log_{10}(BW)$) is intrinsically elevated by 7.78 dB compared to a narrowband 125 kHz signal. This flight experiment empirically confirms that artificially widening the LoRa bandwidth via SDR successfully processes the high-throughput MAVLink protocol without crashing, or dropping state packets. The Raspberry Pi 5 and the BladeRF successfully managed the immense data rates required for 3 MHz FDD CSS modulation in an active, vibrating airborne environment without triggering thermal throttling or USB bus exhaustion.

VII. Conclusion

This paper presents a UAV telemetry system implemented with SDR, using a customised *gr-lora_sdr* on BladeRF 2.0 micro xA4 hardware to expand LoRa's physical layer to 3 MHz, enabling a high-throughput, low-latency communication link suitable for continuous MAVLink data exchange. The 3 MHz bandwidth accommodates the cryptographic overhead of MAVLink v2 message signing, while the 254 MHz separation between uplink and downlink frequencies prevents local receiver desensitization. Empirical flight tests validated the system, sustaining a stable bidirectional MAVLink connection with QGroundControl at 400 meters using only the native 6.3 mW transmit power of the SDR interfaced with an airborne Raspberry Pi 5, combining the robustness and Doppler tolerance of CSS with the continuous throughput required for modern secure and autonomous UAV operations.

REFERENCES

1. ArduPilot Development Team, MAVLink Telemetry Bandwidth Requirements and High Latency Modes, ArduPilot Documentation, 2022.
2. Dronecode Project, QGroundControl User Guide: Telemetry and Parameter Synchronization. [Online]. Available: docs.qgroundcontrol.com.
3. Dronecode Project, Message Signing (Authentication) – MAVLink Guide, MAVLink Documentation, 2023.
4. *Seller O. and Sornin N.* Low Power Long Range Transceiver (LoRa), Semtech Application Note AN1200.22.
5. *Vangelista L.* Frequency Shift Chirp Modulation: The LoRa Modulation // IEEE Signal Processing Letters, vol. 24, no. 12, PP. 1818–1821, Dec. 2017.
6. GNU Radio Foundation, "GNU Radio Manual and C++ API Reference: Message Passing and PDUs, 2022.
7. Nuand LLC, BladeRF 2.0 Micro Architecture and Specifications, Nuand Documentation.
8. Raspberry Pi Ltd, "Raspberry Pi 5 Product Brief and BCM2712 SoC Architecture, 2023.
9. Federal Communications Commission (FCC), Part 15 Radio Frequency Devices, 47 CFR §15.247.
10. ArduPilot Development Team, SiK Telemetry Radio Specifications and TDM Latency, ArduPilot Wiki.
11. Proakis J. and Salehi M. Digital Communications, 5th ed. McGraw-Hill, 2008.
12. ExpressLRS Open Source Project, ExpressLRS Documentation: Telemetry Bandwidth Limits and Scheduling. [Online].
13. 3GPP (3rd Generation Partnership Project), Release 15/16: UAV Communications and Aerial UE Support.
14. *Tapparel J., Afisiadis O., Mayoraz P., Balzotti A. and Burg A.* gr-lora: A GNU Radio Implementation of the LoRa PHY Layer, IEEE Transactions on Communications, 2020.
15. Telecommunications Circuits Laboratory (TCL), Reverse Engineering of the LoRa PHY Layer, EPFL, Tech. Rep., Feb. 2020. Available: https://www.epbgdfl.ch/labs/tcl/wp-content/uploads/2020/02/Reverse_Eng_Report.pdf
16. *Tapparel J.* gr-lora_sdr repository, GitHub [Online]. Available: https://github.com/tapparelj/gr-lora_sdr.
17. The Things Network (TTN), LoRa Airtime Calculator [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/airtime-calculator>.
18. Oppenheim A. and Schaffer R. Discrete-Time Signal Processing, 3rd ed. Pearson, 2010.
19. Holybro, Pixhawk 6C Flight Controller Technical Specifications and Architecture, 2022.
20. Osmocom (Open Source Mobile Communications), gr-osmosdr: GNU Radio block for interfacing with SDR hardware. [Online].
21. *Shannon C.* A Mathematical Theory of Communication, originally published in Bell System Technical Journal, Vol. 27. PP. 379–423 and 623–656, July and October 1948.

МЕТОД ОРГАНИЗАЦИИ СВЯЗИ LoRa В БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМОГО РАДИО

О. Туманян¹, Л. Киракосян²

¹ Ереванский государственный университет

² Российско-Армянский университет

hovhannes.tumanyan1@edu.y-su.am, kirakosyan.lilia@student.rau.am

АННОТАЦИЯ

В данной статье речь идет о том, что, поскольку радиус действия беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) продолжает расширяться, острая необходимость в высоконадежных каналах передачи данных на большие расстояния вызывает значительный интерес в области энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия (LPWAN). Модули LoRa часто используются для телеметрии БПЛА; однако обычно они работают на фиксированном частотном канале, что делает канал связи уязвимым к радиоэлектронному подавлению (глушению). В то же время системы на базе программно-определяемого радио (SDR) могут решить эту проблему за счет изменения рабочей частоты. Технология SDR предлагает гибкость, позволяя динамически менять частоты для избежания активных радиопомех и создавать настраиваемые широкополосные каналы, которые стандартные чипы поддерживать не могут. Используя SDR BladeRF 2.0 micro xA4 и специализированную обработку сигналов в GNU Radio, мы создали непрерывный канал связи LoRa с частотным дуплексным разделением (FDD). За счет искусственного расширения полосы пропускания до 3 МГц и размещения восходящего (uplink) и нисходящего (downlink) каналов в совершенно разных частотных диапазонах, система без труда справляется с потоком данных, необходимым для наземных станций управления. Данная архитектура сохраняет надежность метода расширения спектра на основе линейной частотной модуляции (CSS), используемого в LoRa, при этом устраняет традиционные узкие места системы. Она легко справляется с дополнительной вычислительной нагрузкой, связанной с шифрованием MAVLink v2, и полностью исключает задержки, возникающие при перекрытии направления передачи.

Ключевые слова: Программно-определяемое радио (SDR), беспилотные летательные аппараты (БПЛА), LoRa, телеметрия, BladeRF.

DOI 10.24412/1829-0450-fm-2026-1-61-67
УДК 519.688

Поступила: 09.03.2026г.
Сдана на рецензию: 10.03.2026г.
Подписана к печати: 19.03.2026г.

ПОВТОРНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ НА АЭРОФОТОСНИМКАХ, ПОЛУЧЕННЫХ С БПЛА

Г.А. Хачатрян, А.С. Сардарян, В.Г. Мелконян, А.Б. Аванян, О.А. Оганесян*

*Российско-Армянский университет
khachatryan_gohar@student.rau.am

АННОТАЦИЯ

Повторное обнаружение объектов на аэрофотоснимках является важной задачей для систем наблюдения, поисково-спасательных операций и экологического мониторинга. Объекты, однажды зафиксированные на изображении, могут исчезать из-за перекрытий, изменения ракурса или временных разрывов между кадрами. Возможность их повторного обнаружения повышает надежность систем воздушного наблюдения. В данной работе предлагается метод повторного обнаружения объектов на аэрофотоснимках, полученных с беспилотных летательных аппаратов. Метод основан на сканировании новых кадров с целью нахождения объекта, наиболее похожего на потерянный, с использованием визуального сходства. Для повышения устойчивости к искажениям применяются методы предварительной обработки изображений, а также используется кластеризация для сокращения области поиска. В систему повторного обнаружения интегрирован алгоритм сопоставления, сравнивающие визуальные признаки потерянного объекта с возможными кандидатами на новых изображениях. Эффективность предложенного подхода подтверждена экспериментами на реальных наборах аэрофотоснимков, демонстрирующими успешное повторное обнаружение объектов в условиях изменяющегося фона, масштаба и освещенности.

Ключевые слова: повторное обнаружение объектов; аэрофотоснимки; беспилотные летательные аппараты.

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) стали важными инструментами в различных задачах компьютерного зрения, включая автономную навигацию, наблюдение, поисково-спасательные операции и мониторинг окружающей среды. Одной из ключевых возможностей таких систем является непрерывное отслеживание объектов интереса в реальном времени. Однако в реальных условиях отслеживаемый объект может временно исчезать из поля зрения камеры из-за перекрытий, резких движений, препятствий или динамических изменений сцены. В отличие от кратковременных сбоях отсле-

живания, вызванных ошибками алгоритма, в подобных ситуациях происходит фактическая временная потеря цели – когда объект выходит за пределы кадра или становится невидимым на некоторое время.

Для обеспечения автономности системы и непрерывности выполнения задачи необходимо, чтобы система отслеживания на основе БПЛА могла автоматически повторно обнаруживать цель после ее повторного появления без вмешательства оператора. В рамках разработки универсального метода повторного обнаружения объектов, не зависящего от конкретных классов объектов, традиционные нейросетевые детекторы были исключены из рассмотрения из-за их высокой ресурсоемкости и зависимости от классов, на которых были обучены. В данной работе предлагается двухэтапный метод повторного обнаружения объектов, специально разработанный для систем компьютерного зрения на борту БПЛА. На первом этапе с помощью классических методов компьютерного зрения генерируются рамки-кандидаты по всей сцене, что существенно сокращает область поиска. На втором этапе производится сопоставление изображений между этими кандидатами и шаблоном, извлеченным из начального вида цели. Такой подход обеспечивает баланс между эффективностью и надежностью, позволяя переобнаруживать объект без дообучения моделей, что делает его особенно подходящим для использования на платформе БПЛА с ограниченными вычислительными ресурсами.

Предлагаемый метод

В рамках данной работы задача повторного обнаружения объекта была разделена на две подзадачи:

- Выделение рамок-кандидатов (candidate boxes selection);
- Сопоставление кандидатов с эталонным шаблоном (template matching).

Предложенный метод сначала формирует предполагаемые области, содержащие объекты, а затем сопоставляет шаблон отслеживаемого объекта с этими областями.

А. Выделение рамок-кандидатов

Поскольку основной целью было создание пайплайна для бесклассового обнаружения объектов (class-agnostic detection), современные модели обнаружения, такие как YOLO [1], Faster R-CNN [2] и Mask R-CNN [3], были исключены. Вместо этого для генерации рамок-кандидатов используются карты границ (edge maps), имитирующие особенности человеческого восприятия визуальных объектов. Такой подход фокусируется на контурной информации, аналогично тому, как человек распознает объекты по их очертаниям на фоне.

Обработка одного кадра выполняется по следующему пайплайну (Рис. 1):

1. Сначала из размытой черно-белой версии изображения извлекается карта границ с использованием метода Канни (“Canny edge detection”)

[4]. Поскольку изображения были получены с БПЛА, большинство объектов содержат резкие и четкие границы, что может привести к генерации нескольких ограничивающих рамок для одного объекта.

2. Для устранения избыточности применяются морфологические операции: дилатация, эрозия, открытие и закрытие. Эти операции помогают устранить шум и объединить разрозненные края.
3. Затем контуры извлекаются с помощью иерархического дерева (tree hierarchy), что позволяет разделять внешние и внутренние контуры. Внешние контуры используются напрямую: их ограничивающие рамки рассматриваются как кандидаты.
4. Для внутренних контуров применяется отдельный алгоритм объединения: ограничивающие рамки группируются по расстоянию между их центрами, предполагая, что они принадлежат одному объекту. Для каждой группы затем формируется новая ограничивающая рамка по выпуклой оболочке (convex hull) вершин всех рамок внутри группы.

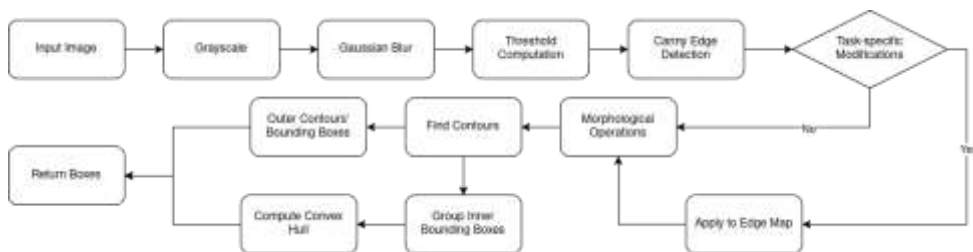


Рисунок 1. Пайплайн алгоритма выделения ограничивающих рамок-кандидатов.

Для конкретных прикладных задач можно также добавлять дополнительные фильтры, такие как:

- Ограничения по площади рамки;
- Ограничения по соотношению сторон;
- Удаление длинных прямых линий с бинарной карты границ – для снижения шума и повышения точности выделения границ объектов.

В. Сопоставление кандидатов с шаблоном

В условиях повторного обнаружения объектов с БПЛА, где цель может существенно менять масштаб и ракурс, а вычислительные ресурсы ограничены, выбор стратегии сопоставления шаблонов приобретает ключевое значение. По этой причине особое внимание уделялось эффективным и быстродействующим методам, способным сохранять устойчивость в условиях ограничений реального времени.

В рамках данной работы было принято решение использовать наиболее легкий и быстрый способ сравнения. Для извлечения признаков (features) из изображения кандидата и шаблона мы использовали классическую нейросеть

для классификации, у которой удалили последний слой классификации, сохранив только экстрактор признаков. Таким образом, для каждого изображения вычисляются векторные представления, а сравнение проводится с использованием косинусного расстояния:

$$\text{dist}(\bar{X}, \bar{Y}) = \frac{\bar{X} \cdot \bar{Y}}{\|\bar{X}\| \cdot \|\bar{Y}\|},$$

где X и Y – векторные представления признаков кандидата и шаблона.

В качестве архитектуры для извлечения признаков использовалась ResNet18 [5]. Эта сеть обладает умеренной глубиной и обеспечивает быстрое извлечение признаков, сохраняя при этом высокую точность сопоставления.

Оценка и экспериментальная проверка метода

А. Набор данных и метрики оценивания

Для оценки нашего подхода лучше всего подходят наборы данных, размеченные для задачи отслеживания объектов, так как разметка в них плотная (то есть выполнена для каждого кадра). Мы выбрали набор данных: Vis Drone Single Object Tracking [6]. Данный набор содержит последовательности аэрофотоснимков, сделанных над городской средой, с отслеживаемыми объектами различных классов. Поскольку в экспериментах используются два случайных кадра из одной последовательности, мы исключили те последовательности, в которых наблюдаются сильные перекрытия (occlusions) или значительная обрезка объектов (truncation). После фильтрации осталось 34896 кадров из 39 последовательностей с полностью видимыми отслеживаемыми объектами.

Для оценки качества совпадения предсказанного ограничивающего прямоугольника с эталонным (ground truth) использовались метрика перекрытия – Intersection over Union (IoU), а также основанная на ней точность – количество верно найденных ограничивающих рамок, то есть тех, у которых IoU превышает 0.5.

В. Эксперименты и результаты

Из каждой последовательности мы случайным образом выбрали пару изображений, имитируя потерю объекта на N -ое количество кадров. В качестве результата работы метода, как было описано в 2.2, выбиралась ограничительная рамка с наименьшим косинусным расстоянием с шаблоном.

Как и ожидалось, качество обнаружения снижалось, когда рядом с объектом отслеживания находились другие объекты, в основном из-за морфологических операций, таких как расширение и эрозия. В таких случаях два или более объектов могут сливаться в один, что приводит к увеличению ограничительной рамки. В случаях, где объект был изолирован от других, алгоритм

успешно предсказывал ограничительные рамки. Пример точного срабатывания алгоритма повторного обнаружения через 1030 кадров после «потери» приведен на Рис. 2.



(а) Кадр с размеченной целью перед исчезновением.



(б) Все кандидаты на кадре после восстановления (через 1030 кадров).



(в) Лучший кандидат – зеленым цветом и цель – синим цветом.

Рисунок 2. Пример работы алгоритма на последовательности из VisDrone.

Заключение

В данной работе представлен легкий и эффективный метод повторного обнаружения объектов на аэрофотоснимках, полученных с БПЛА. Метод основан на генерации рамок-кандидатов с использованием информации о границах объектов и последующем сопоставлении с шаблоном. Он не требует предварительного обучения и может применяться на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами. На данном этапе эксперименты показали высокое качество предложенного метода. В дальнейшем будут проведены более детальные эксперименты и исследования влияния фона, масштаба и света на качество повторного обнаружения.

Рассмотренный алгоритм может быть интегрирован в систему отслеживания объектов, что позволит повысить ее надежность и качество. Для эффективной интеграции необходимо разработать алгоритм, способный автоматически определять момент потери объекта и момент, когда нужно начинать поиск рамок-кандидатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Redmon J. *et al.* You only look once: Unified, real-time object detection // "Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition", 2016. СС. 779–788.
2. Ren S. *et al.* Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks
3. // "IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence". Т. 39. №. 6. 2016. СС. 1137–1149.
4. He K. *et al.* Mask r-cnn // "Proceedings of the IEEE international conference on computer vision", 2017. СС. 2961–2969.
5. Canny J. A computational approach to edge detection // "IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence", №. 6. 1986. СС. 679–698.
6. He K. *et al.* Deep residual learning for image recognition // "Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition", 2016. СС. 770–778.
7. Zhu P. *et al.* Vision meets drones: A challenge // arXiv preprint arXiv:1804.07437. 2018.

OBJECT RE-DETECTION IN AERIAL IMAGERY CAPTURED BY UAVS

G. Khachatryan, A. Sardaryan, V. Melkonyan, A. Avanyan, O. Hovhannisyan
Russian-Armenian University

ABSTRACT

Object re-detection in aerial imagery is a critical task for surveillance systems, search and rescue operations, and environmental monitoring. Objects that have previously appeared in a frame may disappear due to occlusions, viewpoint changes, or temporal gaps between frames. The ability to re-detect such objects significantly enhances the reliability of aerial observation systems. This work proposes a method for object re-detection in aerial images captured by unmanned aerial vehicles (UAVs). The method involves scanning new frames to find the object most similar to the previously lost one, using visual similarity. To improve robustness

against distortions, the approach includes image preprocessing techniques and clustering to narrow the search area. The re-detection system incorporates a matching algorithm that compares the visual features of the lost object with potential candidates in subsequent frames. The effectiveness of the proposed approach is validated through experiments on real aerial image datasets, demonstrating successful object re-detection under varying conditions of background, scale, and lighting.

Keywords: object re-detection; aerial images; unmanned aerial vehicles.

DOI 10.24412/1829-0450-fm-2026-1-68-75
УДК 519.688

Поступила: 09.03.2026г.
Сдана на рецензию: 10.03.2026г.
Подписана к печати: 19.03.2026г.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СОПОСТАВЛЕНИЯ ИСХОДНОГО И БИНАРНОГО КОДА

О.М. Мовсисян, А.К. Асланян

*Российско-Армянский университет
hovhannes.movsisyan@rau.am, hayk.aslanyan@rau.am
ORCID: 0000-0002-7582-7948, 0000-0002-7320-4835*

АННОТАЦИЯ

В данной статье рассматривается проблема сопоставления исходного и исполняемого кода функций в условиях отсутствия отладочной и символьной информации. Представлен инструмент Pigaioс++, являющийся развитием инструмента Pigaioс. Основные улучшения включают внедрение механизмов предварительного сопоставления библиотечных функций, а также использование новых метрик, таких как сравнение сигнатур функций и анализ вызовов библиотечных функций. Предложен метод повышения точности сопоставления за счет анализа контекста расположения функций относительно уже идентифицированных пар. Для оценки эффективности разработан алгоритм автоматической генерации тестов. Экспериментальные результаты на базе пакета GNU Coreutils показали, что внесенные модификации позволили повысить показатель точности на 14.15% и полноты на 10.3% по сравнению с базовым решением.

Ключевые слова: сопоставление кода, статическое сопоставление, анализ уязвимостей.

Введение

В современном мире требования к программному обеспечению непрерывно растут. В условиях постоянно усиливающейся конкуренции велико стремление к быстрому получению результатов. В связи с этим часто используются уже существующие инструменты и библиотеки, которые могут применяться как в исходном виде, так и с определенными изменениями. Все это может привести к нарушениям авторских прав и условий лицензирования программного обеспечения с открытым исходным кодом. Например, если какая-либо программа имеет лицензию GNU General Public License (GPL) [1], то любой, кто изменяет или использует эту программу, обязан распространить исходный код под той же лицензией..

Программисты и компании продают пользователю в основном исполняемый код, а не исходный. Следовательно, для обнаружения вышеупомянутых

нарушений часто необходимо понять, был ли данный исполняемый код получен из данного исходного кода.

Вместе с постоянно растущими объемами кода увеличивается и количество содержащихся в них уязвимостей. Разрабатываются различные инструменты для автоматического обнаружения ошибок как в исходном, так и в исполняемом коде. И если известно о наличии уязвимости в некотором фрагменте исходного кода, то, найдя подобный участок кода в исполняемом файле, можно предположить, что такая же уязвимость присутствует и в исполняемом коде. Верно и обратное [7, 8].

Таким образом, сопоставление исходного и исполняемого кода имеет ряд применений:

- **Выявление нарушений авторских прав и проверка лицензии GNU GPL (General Public License).** Ставится задача проверить, из какого исходного кода был получен данный исполняемый код.
- **Обнаружение уязвимостей.** Ставится задача найти в исполняемом (исходном) коде участок, аналогичный уязвимому фрагменту, присутствующему в исходном (исполняемом) коде.
- **Задачи обратной разработки (Reverse engineering).** Ставится задача восстановления исходного кода, соответствующего данному исполняемому коду.

Сходство исходного и исполняемого кода

Известно, что из одного и того же исходного кода можно получить различный исполняемый код. Это обусловлено тем, что разные компиляторы могут генерировать разный объектный код, а также применять различные оптимизации. Исполняемые файлы также различаются в зависимости от архитектуры целевой машины.

Будем считать, что данный исполняемый код подобен исходному коду, если он может быть получен в результате компиляции этого исходного кода.

Постановка задачи

Разработать и реализовать инструмент сопоставления исходного и исполняемого кода, который обеспечивает соответствие между функциями исходного и исполняемого кода. Рассматривается случай, когда предоставленный исходный код может не компилироваться (например, из-за отсутствия некоторых файлов), но при этом является синтаксически анализируемым.

Если в исполняемом коде присутствует отладочная информация, решение задачи тривиально, так как она содержит прямые связи между строками исходного кода и инструкциями исполняемого кода. Однако следует отметить, что из исполняемого кода, предоставляемого конечному пользователю, отладочная и символьная информация обычно удаляется [2] (связь между строками исходного кода и инструкциями разрывается, а имена функций заменяются или удаляются).

В данной работе мы будем исходить из предположения, что в исполняемом коде, сравниваемом с исходным, отладочная и символьная информация отсутствует.

Существующие инструменты

Существует несколько инструментов, предназначенных для сопоставления исходного и исполняемого кода:

- **Pigaios** [3] – принимает на вход исполняемый и исходный код и находит соответствующие друг другу функции. Инструмент выполняет сопоставление на основе имен функций, строковых констант, количества циклов и условий, вызовов функций, глобальных переменных, количества операторов *switch* и их вариантов (*case*), а также рекурсивности функций. Инструмент не требует компиляции исходного кода – достаточно лишь успешного прохождения синтаксического анализа.
- **BinPro** [4] – принимает на вход исполняемый и исходный код и вычисляет коэффициент сходства, который представляет собой процент функций исходного кода, нашедших соответствие в исполняемом файле. Чем выше этот коэффициент, тем больше вероятность того, что исполняемый код был скомпилирован из данного исходного кода. Алгоритм сопоставления устойчив к таким изменениям, как правка комментариев, переименование функций или изменение порядка объявления переменных. Более существенное влияние на коэффициент сходства оказывают структурные изменения программы и изменение значений констант. На основе предварительно собранных данных инструмент пытается предугадать, какие функции исходного кода будут встроены (*inline*). Сопоставление выполняется на основе строковых и числовых констант, вызовов библиотечных функций, графа вызовов и количества аргументов. Требуется, чтобы исходный код был компилируемым с помощью GCC или Intel C++ Compiler (ICC). Исполняемый код должен быть скомпилирован под архитектуру x86-64 с заранее известным уровнем оптимизации.
- **Re-Source** [5] – получает на вход только исполняемый код и ищет совпадения в базах данных, содержащих исходный код. Инструмент выполняет сопоставление на основе константных значений операндов, вызовов функций и строковых констант. Базы исходного кода, использовавшиеся инструментом, в настоящее время недоступны.
- **CodeBin** [6] – принимает на вход только исполняемый код и ищет соответствия в онлайн-базе исходных кодов. Сопоставление основано на количестве операндов, вызовах пользовательских и библиотечных функций, строковых и числовых константах, а также сложности графа потока управления.

Алгоритмы сопоставления вышеуказанных инструментов учитывают лишь часть программных инструкций (вызовы функций, количество циклов) и строковые константы, что зачастую приводит к низкой точности. При этом только инструмент Pigaios способен работать с некомпилируемым исходным кодом.

Инструмент Pigaios

Инструмент Pigaios принимает на вход исходный и исполняемый код, а на выходе выдает пары сопоставленных функций. Работа инструмента состоит из трех этапов.

На первом этапе из исходного и исполняемого кода извлекаются определенные свойства (имена функций, строковые и числовые константы и др.) с использованием “Clang bindings” [9] и IDA Pro [10], соответственно.

На втором этапе на основе выбранных метрик из исходного и исполняемого кода отбираются потенциально схожие функции. Используются следующие метрики:

- Идентичность имен функций – выбираются функции с одинаковыми именами.
- Идентичность констант – выбираются функции, содержащие одни и те же строковые или числовые константы.
- Идентичность исходного файла – выбираются функции, принадлежащие исходным файлам с одинаковыми именами.

На третьем этапе для каждой пары на основе извлеченных характеристик вычисляется коэффициент сходства. К этим характеристикам относятся:

- имя функции;
- количество условий;
- константы;
- количество циклов;
- количество операторов switch;
- вызовы функций;
- глобальные и локальные переменные;
- рекурсивность.

Чем больше характеристик совпадает, тем выше вероятность того, что функции исходного и исполняемого кода идентичны. Пары, чей коэффициент сходства превышает заранее заданный порог, сохраняются как схожие функции. На третьем этапе, основываясь на парах функций, отобранных на предыдущем этапе, выбираются новые кандидаты с использованием структурных метрик:

1. «Соседние» функции. Если функции f_s (исходный код) и f_b (исполняемый код) уже сопоставлены, и в исходном коде есть функция g_s , которая предшествует или следует за f_s , а в исполняемом коде есть функция g_b , предшествующая или следующая за f_b , то пара (g_s, g_b) выбирается для сравнения.

2. Вызываемые функции. Если f_s и f_b сопоставлены, и f_s вызывает g_s , а f_b вызывает g_b , то пара (g_s, g_b) выбирается для сравнения.
3. Вызывающие функции. Если f_s и f_b сопоставлены, и g_s вызывает f_s , а g_b вызывает f_b , то пара (g_s, g_b) выбирается для сравнения.

Для этих новых пар также вычисляется коэффициент сходства. Процесс поиска новых пар продолжается итеративно до тех пор, пока это возможно по указанным метрикам. Пары с высоким коэффициентом сходства добавляются к списку найденных соответствий.

Итоговым результатом работы инструмента является совокупность пар схожих функций, накопленных на втором и третьем этапах.

Инструмент Pigaios++

Для улучшения работы инструмента Pigaios были добавлены механизмы сопоставления библиотечных функций, новые метрики и дополнительные свойства сравнения.

Сопоставление библиотечных функций

На втором этапе работы инструмента, перед отбором пар на основе метрик, выполняется сопоставление библиотечных функций. Важно отметить, что имена библиотечных функций не удаляются из исполняемого кода даже в тех случаях, когда в нем отсутствует символьная информация.

Процесс организован следующим образом:

Из исполняемого кода выделяются все библиотечные функции. Их обнаружение осуществляется с помощью инструмента IDA Pro с использованием технологии F.L.I.R.T. (Fast Library Identification and Recognition Technology) [11]. Затем найденные функции ищутся в исходном коде по их именам. Если в исходном коде обнаруживается функция с идентичным именем, данная пара считается точно сопоставленной. Функции, сопоставленные на данном этапе, исключаются из дальнейшего рассмотрения как потенциальные кандидаты на других стадиях работы алгоритма. Этот шаг направлен на оптимизацию производительности инструмента, а также позволяет значительно снизить вероятность выбора ошибочных пар функций в ходе последующего анализа.

Метрики

К существующим метрикам инструмента Pigaios были добавлены новые:

- **Сигнатура функции** – для сравнения выбираются функции из исходного и исполняемого кода, имеющие идентичные сигнатуры.
- **Вызовы библиотечных функций** – для сравнения отбираются функции, которые вызывают одни и те же библиотечные функции.

- **Функции, расположенные между сопоставленными парами** – выбираются пары функций, которые находятся в интервалах между уже сопоставленными строками исходного кода и соответствующими адресами исполняемого кода.

Свойства сравнения

В перечень свойств для сравнения функций было добавлено новое свойство – **сигнатура функции**. Теперь для каждой сравниваемой пары, помимо вышеупомянутых характеристик, учитывается и соответствие сигнатур, что влияет на итоговый коэффициент сходства.

Тестирование

Для оценки точности работы инструментов была разработана автоматизированная система тестирования. Процесс тестирования состоит из двух этапов: автоматической генерации тестов и непосредственного тестирования инструментов на этих данных. Для автоматической генерации тестов этого используются две версии одной и той же программы (которые могут совпадать), обозначим их V1, V2. На первом этапе исходный код V1 компилируется с отладочной информацией, что позволяет сохранить символьную информацию, в частности, имена функций. Компиляция может выполняться с различными уровнями оптимизации. Полученный исполняемый код обозначим B1.

Затем выполняется сопоставление функций из B1 и V2, имеющих одинаковые имена. Полученные пары представляют собой «эталонные» соответствия, которые в лучшем случае должен обнаружить тестируемый инструмент при сравнении B1 и V2.

На втором этапе тестируемый инструмент применяется к сформированным тестам, после чего вычисляются показатели точности (precision) и полноты (recall).

В начале процесса сохраняется соответствие между именами функций исполняемого кода и адресами их начала. Затем из исполняемого файла удаляется вся символьная информация (включая имена функций) с помощью утилиты strip [12]. Удаление символов необходимо для максимального приближения условий теста к реальным сценариям, так как поставляемое пользователям ПО обычно не содержит такой информации. На следующем шаге исходный и «очищенный» исполняемый код подаются на вход тестируемого инструмента.

Пары функций, сопоставленные инструментом, сравниваются с эталонными парами, полученными на первом этапе. Для каждой найденной функции из исполняемого кода восстанавливается ее имя (по ранее сохраненному адресу начала функции). Если в найденной паре имена функций из исходного

и исполняемого кода совпадают, результат считается истинно положительным, в противном случае – ошибкой. На основе этих данных рассчитываются точность и полнота.

Для проведения тестирования использовался исходный код libxml2 [13] и стандартного пакета программ coreutils [14] операционной системы Linux. Пакет включает более ста программ и был выбран для обеспечения разнообразия входных данных.

Результаты

Инструмент Pigaioс++ был протестирован с помощью разработанной автоматизированной системы. В Табл. 1 приведено сравнение результатов работы оригинального инструмента Pigaioс и его модифицированной версии Pigaioс++.

Таблица 1. Сравнение результатов Pigaioс и Pigaioс++

Исходный Код	Исполняемый Код (Оптимизация)	Pigaioс Точность (%)	Pigaioс++ Точность (%)	Pigaioс Полнота (%)	Pigaioс++ Полнота (%)
coreutils-8.18	coreutils-8.18 (O0)	18.7	34.7	3.1	9.2
coreutils-8.32	coreutils-8.18 (O0)	17	33.7	2.8	9.7
coreutils-8.18	coreutils-8.18 (O3)	12.1	27.7	2.6	9.4
libxml-2	libxml2.so.2(02)	22.4	30.7	25.8	36.9

Анализ сравнения показывает, что внесенные изменения положительно повлияли на итоговые показатели и повысили точность и полноту работы инструмента. В частности, показатель точности улучшился в среднем на **14.15%**, а полнота – на **10.3%**.

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.en.html>
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Debug_symbol

3. <http://joxeankoret.com/blog/2018/08/12/histories-of-comparing-binaries-with-source-codes/>
4. *Miyani D., Huang Z., Lie D.* Binpro: A tool for binary source code provenance [J]. arXiv preprint arXiv:1711.00830, 2017.
5. *Rahimian A., Charland Ph., Preda S. and Debbabi M.* (2012). RESource: a framework for online matching of assembly with open source code. In International Symposium on Foundations and Practice of Security. Springer, 211–226.
6. <https://users.encs.concordia.ca/~mmannan/student-resources/Thesis-MASc-Shahkar-2016.pdf>
7. *Keropyan G., Vardanyan V., Aslanyan H., Kurmangaleev S. and Gaissaryan S.* Multiplatform Use-After-Free and Double-Free Detection in Binaries. Mathematical Problems of Computer Science, vol. 48, 2017. PP. 50–56.
8. *Aslanyan H., Asryan S., Hakobyan J., Vardanyan V., Sargsyan S. and Kurmangaleev S.* Multiplatform Static Analysis Framework for Programs Defects Detection. In CSIT Conference 2017, Yer., Armenia, 2017.
9. <https://clang.llvm.org/docs/Tooling.html>
10. <https://www.hex-rays.com/ida-pro/>
11. https://www.hex-rays.com/products/ida/tech/flirt/in_depth/
12. <https://sourceware.org/binutils/docs/binutils/strip.html>
13. <https://github.com/coreutils/coreutils>

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF METHODS FOR SOURCE AND BINARY CODE MATCHING

H. Movsisyan, H. Aslanyan
Russian-Armenian University

ABSTRACT

This paper addresses the problem of matching source code with its corresponding executable functions in the absence of debugging and symbol information. We present Pigaio++, an enhanced tool built upon the Pigaio framework. Key improvements include the integration of preliminary library function matching mechanisms and the introduction of new metrics, such as function signature comparison and library call analysis. Furthermore, a method is proposed to improve matching precision by analyzing the positional context of functions relative to already identified pairs.

To evaluate the effectiveness of the tool, an automated test generation algorithm was developed. Experimental results conducted on the GNU Coreutils suite demonstrate that these modifications improved the average precision by 14.15% and recall by 10.3% compared to the baseline implementation.

Keywords: code matching, static matching, vulnerability analysis.

DOI 10.24412/1829-0450-fm-2026-1-76-84
УДК 519.688

Поступила: 20.03.2026г.
Сдана на рецензию: 23.03.2026г.
Подписана к печати: 27.03.2026г.

АЛГОРИТМ ГЕНЕРАЦИИ СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ЗАДАЧ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ UNREAL ENGINE 5

*К.С. Сурменелян, А. Ж. Арамян, О.А. Ованнисян, М.М.Смбатян,
В.Т. Погосян, А.А. Маладжян*

Российско-Армянский университет

*karolina.surmenelyan@student.rau.am, aramyan.arpine@student.rau.am,
olga.hovhannisyanyan@ispras.ru, meri.smbatyan@student.rau.am,
vik.poghosyan01@gmail.com, malajyanartur@gmail.com*

АННОТАЦИЯ

В данной статье представлен алгоритм генерации синтетических данных для задач дистанционного зондирования, реализованный в среде Unreal Engine 5. Подход основан на процедурном моделировании городской среды, стохастическом размещении объектов с геометрическими и семантическими ограничениями и моделировании параметров виртуальной камеры. Аннотации формируются автоматически из трехмерной сцены и включают ограничивающие рамки и семантические маски. Предложенный алгоритм обеспечивает согласованность между изображениями и разметкой и позволяет масштабируемо генерировать обучающие данные для задач компьютерного зрения в дистанционном зондировании.

Ключевые слова: синтетические данные, “Unreal Engine 5”, дистанционное зондирование, автоматическая разметка, компьютерное зрение.

Введение

Одной из ключевых проблем компьютерного зрения в дистанционном зондировании является ограниченная доступность и несовершенное качество размеченных данных (Рис.1). В отличие от обычных фотографий, данные аэросъемки и спутникового мониторинга характеризуются высокой плотностью объектов, вариативностью углов обзора и сильной зависимостью от условий освещения и атмосферных явлений. Традиционная ручная разметка таких изображений трудозатратна, подвержена ошибкам интерпретации и часто не позволяет достичь пиксельной точности, необходимой для современных глубоких нейронных сетей, что, в конечном итоге, снижает их обобщающую способность.

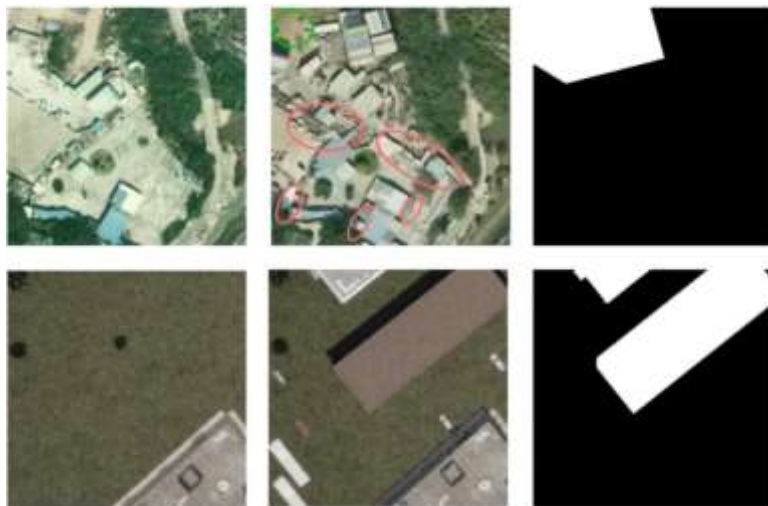


Рис. 1. Сравнение масок Change Detection: SYSU-CD (верх) и наши синтетические данные (низ).

Для уменьшения зависимости от ручной разметки применяются методы самообучения и полуконтролируемого обучения [1, 2], однако они по-прежнему функционально зависят от специфики данных целевой области и крайне чувствительны к шуму в метках. Генеративные модели, включая современные диффузионные архитектуры [3, 4], позволяют синтезировать визуально реалистичные изображения, но обладают существенным недостатком: они обеспечивают ограниченный контроль над геометрией сцены и физическими параметрами съемки (высота, фокусное расстояние, угол наклона камеры). Более того, такие модели не гарантируют получение точной и семантически согласованной разметки.

В отличие от них, использование специализированных 3D-симуляций позволяет полностью автоматизировать процесс аннотирования и реализовать концепцию управляемой генерации. Это дает возможность явно задавать состав сцены и параметры виртуального сенсора, получая идеально согласованные пары «изображение-маска» [5, 6].

Целью данной работы является описание алгоритма генерации синтетических данных для задач дистанционного зондирования на базе “Unreal Engine 5” [7], позволяющего создавать реалистичные сцены и автоматически извлекать точные аннотации из виртуальной среды. В отличие от существующих подходов, предлагаемый алгоритм реализует процедурный метод формирования локаций и стохастическое размещение объектов с учетом их физического взаимодействия. Это обеспечивает строгий контроль над геомет-

рией сцены и метаданными аннотаций, формируя качественные наборы данных для предобучения моделей в условиях дефицита реальных размеченных выборок.

В качестве демонстрации применимости предложенного подхода были рассмотрены две типичные задачи дистанционного зондирования: “Change Detection” и “Small Object Detection”.

Задача “Change Detection” заключается в выявлении изменений между изображениями одной и той же территории, полученными в разные моменты времени, например при строительстве зданий или изменении инфраструктуры (Рис. 2).

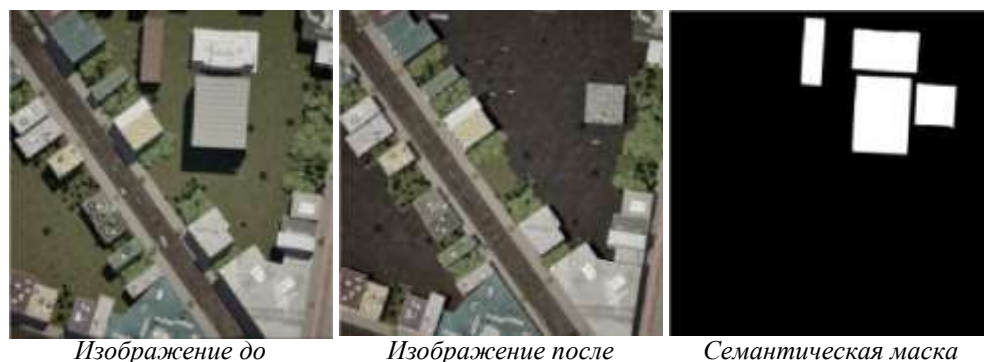


Рис.2. Пример синтетически сгенерированной пары изображений и маски изменений для задачи Change Detection.

Задача “Small Object Detection” направлена на обнаружение малых объектов на аэрокосмических изображениях, таких как транспортные средства, которые занимают небольшое количество пикселей и располагаются в плотной городской среде (Рис. 3).

Предлагаемый алгоритм состоит из трех основных этапов:

1. Моделирование виртуальной среды
2. Генерация синтетических данных
3. Автоматическая аннотация.

1. Моделирование среды

Городские сцены формируются в “Unreal Engine 5” с использованием процедурной генерации, данных “OpenStreetMap” [8] и инструмента “City-BLD” [9], предназначенного для создания городской планировки (Табл. 1). Такой подход позволяет генерировать топологически правдоподобные структуры застройки и варьировать параметры окружения, включая геометрию зданий, дорожную сеть и элементы городской инфраструктуры. Дополни-

тельно настраиваются освещение, атмосферные эффекты и параметры рендеринга, что обеспечивает реалистичность сцены и полный контроль над ее составом при генерации синтетических данных.

Таблица 1. Характеристики синтетических сцен и статистика генерации изображений.

	City1	City2	City3	OSM City
Размеры (км)	1.5 × 1.5	1.0 × 1.0	1.5 × 1.5	4.0 × 2.5
Количество синтетических изображений	20 000	25 000	50 000	35 000

2. Генерация синтетических данных

Процесс генерации данных строится на алгоритмическом переборе состояний виртуальной среды, где положение каждого элемента определяется заданными геометрическими и семантическими ограничениям.

Каждая итерация направлена на создание согласованной пары $\{I, A\}$, где I – синтезированные изображения, а A – соответствующий им набор высокоточных аннотаций.

2.1 Логика размещения объектов и ограничения

Размещение объектов формулируется как задача вероятностного выбора состояний с ограничениями в специальной евклидовой группе $SE(3)$, которая представляет собой совокупность преобразований твердого тела. Для каждого экземпляра объекта o_i его поза определяется вектором состояния $s_i = (t_i, R_i)$ в мировой системе координат “Unreal Engine 5”, где $t_i \in R^3$ – вектор смещения, а $R_i \in SO(3)$ – матрица вращения.

Класс объекта L_i выбирается стохастически из множества классов L с использованием взвешенного дискретного распределения $L_i \sim Discrete(L, w)$, где w – настраиваемый вектор весов. Это позволяет контролировать соотношение классов в генерируемом наборе данных.

Позиция t_i объекта o_i определяется проекцией луча из виртуальной камеры в сцену, а ориентация R_i согласуется с поверхностью размещения и, при необходимости, с направлением дорожной траектории.

Для предотвращения некорректных конфигураций выполняется проверка пересечений между объектами и геометрией сцены.

Такой подход позволяет формировать правдоподобные сцены с контролируемым составом и распределением объектов.

2.2 Моделирование виртуальной камеры

Камера моделируется как параметризуемый виртуальный сенсор с настраиваемыми внутренними K (тип проекции, разрешение, FOV и т.д.) и внешними параметрами $E = [R | t]$. (положение и ориентация). Внешние параметры определяют наблюдаемую область, служащую опорным элементом для последующего размещения объектов. Использование ортографической проекции позволяет имитировать спутниковую съемку, в то время как перспективная проекция используется для симуляции ракурсов БПЛА.

3. Автоматическая аннотация

Одно из преимуществ “Unreal Engine 5” – получение точных аннотации благодаря полной информации о геометрии элементов сцены (Рис. 3). Объекты делятся на отслеживаемые и неотслеживаемые, при этом в разметку включаются только целевые классы. Алгоритм автоматически формирует два типа аннотаций A : ограничивающие рамки и семантические маски, согласованные с изображением и лишенные ошибок ручного аннотирования.

- **Семантические маски.** Маски формируются автоматически на основе метаданных виртуальной среды. Для повышения качества обучения выполняется постобработка: мелкие фрагменты объектов, возникшие из-за частичных перекрытий, удаляются, если их площадь ниже установленного порога, что минимизирует шум в данных.
- **Ограничивающие рамки.** Для каждого объекта восемь вершин его 3D-ограничивающей рамки $\{v_j\}_{j=1}^8$ проецируются на плоскость изображения. Итоговая 2D-ограничивающая рамка определяется минимальными и максимальными координатами проекций, ограниченными размерами кадра $W \times H$. Это гарантирует точность разметки даже для объектов, частично находящихся за пределами видимости.



Синтезированное изображение

Синтезированное изображение с ограничивающими рамками

Семантическая маска

Рисунок 3. Пример синтетического изображения и автоматически сгенерированных аннотаций для задачи “Small Object Detection”.

Результаты

Для оценки эффективности предложенного алгоритма были проведены эксперименты на двух задачах дистанционного зондирования: “Change Detection” и “Small Object Detection”. В обоих случаях использовалась схема обучения, при которой модель предварительно обучалась на синтетических данных, после чего выполнялось дообучение на небольшом объеме реальных размеченных данных.

Результаты экспериментов в задачах “Change Detection” и “Small Object Detection” подтверждают эффективность предложенного подхода. Как видно из Рис. 4, использование синтетического предобучения позволяет выявлять дополнительные изменения, которые могут отсутствовать в разметке, но соответствуют визуальному содержанию сцены.

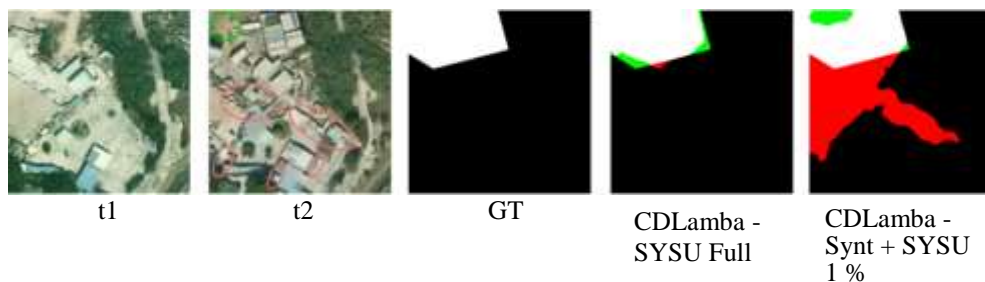


Рисунок 4. Пример Change Detection: (1) изображение t_1 (до изменений), (2) изображение t_2 (после изменений), (3) эталонная сеиантическая маска изменений, (4) предсказание базовой модели, обученной на реальных данных, (5) предсказание модели, предварительно обученной на синтетических данных с последующим дообучением на 1% реальных данных.

Согласно Табл. 2, использование модели “CDLamba” [10] с добавлением синтетических данных (Syn + 10% real) стабильно улучшает метрики на всех датасетах. На LEVIR-CD [11] показатель F1 вырос с 0.861 до 0.882, а IoU – с 0.756 до 0.788. Аналогичный рост зафиксирован на “WHU-CD” [12] (F1 с 0.833 до 0.848) и SYSU-CD [13] (F1 с 0.785 до 0.806), что доказывает высокую обобщающую способность моделей, предобученных на синтетических данных, при дефиците реальных аннотаций.

В задаче “Small Object Detection” (Табл. 3) на датасете “UAVDT” [14] предобучение на синтетических данных обеспечило существенный скачок точности. Для модели “ESOD” [15] значение $mAP@0.5$ увеличилось с 0.548 до 0.660, а Recall – с 0.583 до 0.687. Для “YOLOv12” [16] + SAHI [17] Precision поднялся с 0.756 до 0.816, а итоговый показатель $mAP@0.5:0.95$ достиг 0.420, что превосходит результат обучения на полном наборе реальных данных

(0.378). Таким образом, пайплайн на базе “Unreal Engine 5” позволяет эффективно компенсировать нехватку дорогостоящей ручной разметки в дистанционном зондировании.

Таблица 2. Результаты “Change Detection” на LEVIR-CD, WHU-CD и SYSU-CD на модели CDLamba.

Dataset	Training	F1	IoU
<u>LEVIR-CD</u>	<u>100% real</u>	<u>0.899</u>	<u>0.8166</u>
LEVIR-CD	10% real	0.861	0.756
LEVIR-CD	Syn + 10% real	0.882	0.788
<u>WHU-CD</u>	<u>100% real</u>	<u>0.9172</u>	<u>0.8470</u>
WHU-CD	10% real	0.833	0.715
WHU-CD	Syn + 10% real	0.848	0.736
<u>SYSU-CD</u>	<u>100% real</u>	<u>0.8242</u>	<u>0.7009</u>
SYSU-CD	10% real	0.785	0.646
SYSU-CD	Syn + 10% real	0.806	0.675

Таблица 3. Результаты Small Object Detection на UAVDT.

Model	Training	Precision	Recall	mAP@0.5	mAP@0.5:0.95
<u>ESOD</u>	<u>100% real</u>	<u>0.733</u>	<u>0.604</u>	<u>0.563</u>	<u>0.254</u>
ESOD	10% real	0.719	0.583	0.548	0.240
ESOD	Syn + 10% real	0.736	0.687	0.660	0.270
<u>YOLOv12+SAHI</u>	<u>100% real</u>	<u>0.777</u>	<u>0.598</u>	<u>0.682</u>	<u>0.378</u>
YOLOv12+SAHI	10% real	0.756	0.592	0.665	0.375
YOLOv12+SAHI	Syn + 10% real	0.816	0.621	0.707	0.420

Заключение

В данной работе представлен алгоритм генерации синтетических данных для задач дистанционного зондирования, реализованный на базе движка “Unreal Engine 5”. Разработанный подход позволяет перенести процесс подготовки обучающих выборок в контролируруемую виртуальную среду, решая проблему дефицита и высокой стоимости реальных размеченных данных.

Основные результаты работы:

1. Автоматизация моделирования. Использование процедурной генерации и данных “OpenStreetMap” позволило создавать топологически достоверные городские локации большой протяженности, обеспечивая визуальное разнообразие застройки и дорожных сетей.
2. **Управляемая генерация.** Реализована логика размещения объектов с учетом физических и семантических ограничений. Это гарантирует отсутствие пересечений и реалистичное расположение объектов в сцене.
3. **Автоматическая аннотация.** Благодаря прямому извлечению данных из метаданных сцены и параметров виртуальной камеры, алгоритм формирует идеально согласованные пары «изображение-маска» и ограничивающие рамки, исключая ошибки человеческого фактора и обеспечивая точность на пиксельном уровне.

Экспериментальная оценка на задачах “Change Detection” и “Small Object Detection” подтвердила, что предварительное обучение моделей на синтетических данных существенно повышает их обобщающую способность. В условиях ограниченного объема реальных аннотаций предложенный алгоритм позволяет эффективно масштабировать обучающие выборки, подготавливая нейросетевые модели к работе со сложными ракурсами и вариативными условиями съемки. Таким образом, работа подтверждает высокую эффективность использования 3D-симуляций как надежного инструмента для развития систем компьютерного зрения в дистанционном зондировании.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Chen Y. et al.* Semi-supervised and unsupervised deep visual learning: A survey // “IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence”, Т. 46. №. 3. 2022. СС. 1327–1347.
2. *Zhang W. et al.* Semi-supervised change detection with data augmentation and adaptive thresholding for high-resolution remote sensing images // “Remote Sensing”. Т. 17. № 2. 2025. С. 178.
3. *Ho J., Jain A., Abbeel P.* Denoising Diffusion Probabilistic Models Advances in Neural Information Processing Systems. Curran Associates. 2020.
4. *Khanna S. et al.* Diffusionsat: A generative foundation model for satellite imagery //arXiv preprint arXiv:2312.03606. 2023.
5. *Kong F. et al.* The Synthinel-1 dataset: A collection of high resolution synthetic overhead imagery for building segmentation // “Proceedings of the IEEE/CVF winter conference on applications of computer vision”, 2020. СС. 1814–1823.
6. *Song J. et al.* SynRS3D: A synthetic dataset for global 3D semantic understanding from monocular remote sensing imagery // “Advances in Neural Information Processing Systems”, Т. 37. 2024. СС. 117388–117425.
7. Epic Games. Unreal Engine 5. <https://www.unrealengine.com/>
8. OpenStreetMap contributors. OpenStreetMap. <https://www.openstreetmap.org/>
9. WorldBLD. CityBLD. <https://worldbld.com/>

10. Wu Z. *et al.* CD-lamba: Boosting remote sensing change detection via a cross-temporal locally adaptive state space model // “IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing”. Т. 19. 2026. СС. 4028–4044.
11. Chen H., Shi Z. A spatial-temporal attention-based method and a new dataset for remote sensing image change detection // “Remote sensing”. Т. 12. №. 10. 2020. С. 1662.
12. Ji S., Wei S., Lu M. Fully convolutional networks for multisource building extraction from an open aerial and satellite imagery data set // “IEEE Transactions on geoscience and remote sensing”. Т. 57. №. 1. 2018. СС. 574–586.
13. Shi Q. *et al.* A deeply supervised attention metric-based network and an open aerial image dataset for remote sensing change detection // “IEEE transactions on geoscience and remote sensing”. Т. 60. 2021. СС. 1–16.
14. Du D. *et al.* The unmanned aerial vehicle benchmark: Object detection and tracking // “Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV)”. 2018. СС. 370–386.
15. Liu K. *et al.* ESOD: Efficient small object detection on high-resolution images // “IEEE Transactions on Image Processing”. Т. 34. 2024. СС. 183–195.
16. Tian Y., Ye Q., Doermann D. Yolov12: Attention-centric real-time object detectors //arXiv preprint arXiv:2502.12524. 2025.
17. Akyon F., Altinuc S., Temizel A. Slicing aided hyper inference and fine-tuning for small object detection //2022 IEEE international conference on image processing (ICIP). IEEE, 2022. СС. 966–970.

SYNTHETIC DATA GENERATION PIPELINE FOR REMOTE SENSING TASKS BASED ON UNREAL ENGINE 5

*K. Surmenelyan, A. Aramyan, O. Hovhannisyanyan, M. Smbatyan,
V. Poghosyan, A. Malajyan
Russian-Armenian University*

ABSTRACT

This paper presents a synthetic data generation pipeline for remote sensing tasks implemented in Unreal Engine 5. The approach is based on procedural modeling of urban environments, stochastic object placement with geometric and semantic constraints, and simulation of virtual camera parameters. Annotations are generated automatically from the 3D scene and include 2D bounding boxes and semantic masks. The proposed pipeline ensures consistency between rendered images and annotations and enables scalable generation of training data for computer vision tasks in remote sensing.

Keywords: synthetic data, Unreal Engine, data annotation, remote sensing.

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

DOI 10.24412/1829-0450-fm-2026-1-85-91
УДК 621.396.96

Поступила: 06.02.2026г.
Сдана на рецензию: 19.02.2026г.
Подписана к печати: 19.02.2026г.

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТНО- МОДУЛИРОВАННЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ ВОЛН (ЛЧМ, FMCW) В ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ РАДИОСИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ОТКРЫТЫХ СРЕДСТВ

Э.Р. Сиволенко, М.В. Пинамян, Б.А. Оганнесян

*Российско-Армянский университет
eduard.sivolenko@rau.am, mpinamyam@gmail.com,
babkenhovhannisyan96@gmail.com*

АННОТАЦИЯ

В работе рассматривается частотно-модулированная непрерывно-волновая радиолокационная технология, широко применяемая в современных измерительных радиолокационных системах. Основное внимание уделяется программной реализации FMCW-радаров с использованием программно-определяемого радио на базе платформы USRP и среды GNU Radio.

Целью исследования является получение функциональной имплементации радара [1] посредством блочной архитектуры и экспериментальная проверка его основных радиолокационных характеристик. В рамках работы реализованы формирование и моделирование отраженных сигналов, цифровая обработка сигнала биений. Экспериментальные исследования направлены на анализ спектральных характеристик.

Показано, что программно-определяемый подход обеспечивает высокую гибкость настройки параметров ЛЧМ-сигнала и позволяет эффективно исследовать влияние полосы частот, длительности частотного свипа и частоты дискретизации на результаты измерений. Полученные результаты подтверждают применимость GNU Radio и USRP в качестве универсальной экспериментальной платформы для исследования FMCW-радиолокационных систем [2] и могут быть использованы при разработке автомобильных радаров, систем предотвращения столкновений и других радиолокационных приложений ближнего действия.

Ключевые слова: программно-определяемое радио, функциональные принципы радиолокационных технологий, GNU Radio, цифровая обработка сигналов.

Введение

Частотно-модулированные непрерывноволновые радиолокационные системы занимают важное место в современной радиолокации благодаря высокой точности измерений, компактности и сравнительно низкой стоимости реализации. Первые теоретические и практические исследования ЛЧМ-радаров были проведены в середине XX века [3], после чего данная технология получила широкое применение в измерительных системах. В последние годы интерес к FMCW-радарам значительно возрос в связи с развитием автомобильных систем помощи водителю и автономного управления [4].

Современные FMCW-радары применяются в системах предотвращения столкновений, контроля «слепых зон», обнаружения посторонних объектов, а также в метеорологических [5] и навигационных системах [6]. Основным преимуществом данной технологии является возможность одновременного измерения дальности и относительной скорости объекта за счет анализа частоты сигнала биений, формируемого при смешивании переданного и отраженного сигналов.

Материал и методы

В качестве экспериментальной платформы использовалась программно-определяемая радиосистема USRP B200, работающая в диапазоне 5–6 ГГц и оснащенная логопериодической антенной (Рис.1). Управление аппаратной частью, формирование зондирующих сигналов и цифровая обработка осуществлялись в среде GNU Radio под управлением операционной системы Linux. Частота дискретизации составляла 10 МГц, центральная частота – 5,9 ГГц коэффициент децимации – 8.



Рисунок 1. Подключение системы.

Зондирующий сигнал формировался в виде линейно-частотно модулированного сигнала с полосой перестройки 5 МГц и начальным смещением –2,5 МГц. Длительности участков СВ, восходящего и нисходящего свипов задавались числом отсчетов 16 384, что при частоте дискретизации 10 МГц соот-

ветствует длительности каждого участка около 1,64 мс. Частотное разрешение составляло около 610 Гц. Передающий и приемный тракты конфигурировались программно с возможностью регулировки коэффициентов усиления (TX ≈ 10 дБ, RX ≈ 30 дБ) и компенсации аппаратной задержки.

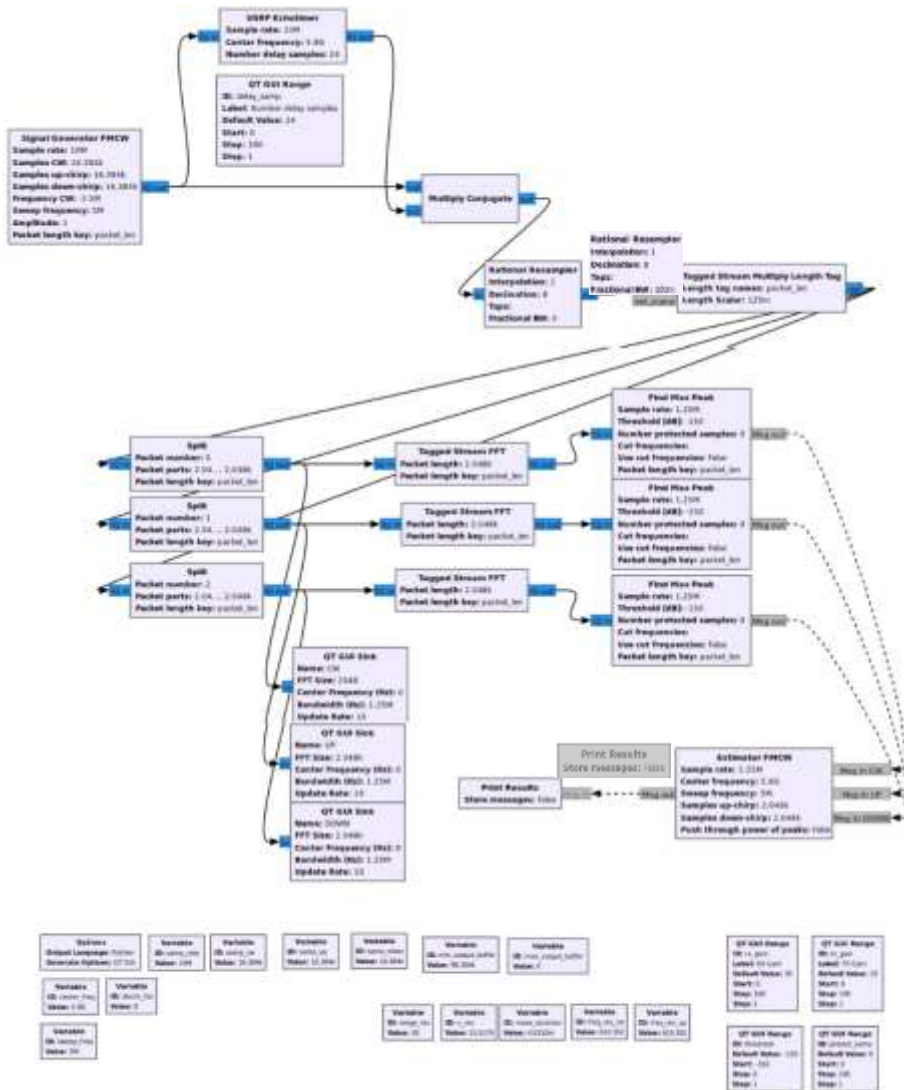


Рисунок 2. Структурно-функциональная блок-схема FMCW в среде GNU Radio.

Функциональная структура измерительного тракта и параметры обработки представлены на структурной схеме GNU Radio (Рис. 2). После приема сигнал

подвергался когерентному перемножению с опорной копией, децимации, сегментации потока на участки CW, UP и DOWN, а также спектральному анализу методом БПФ с длиной окна 2048 отсчетов. Обнаружение отраженных компонент выполнялось автоматическим поиском максимальных спектральных пиков с порогом -150 дБ. Визуализация спектров и временных зависимостей выполнялась в реальном времени средствами графического интерфейса Qt.

Примененная методика обеспечила воспроизводимость измерений и получение экспериментальных данных, достаточную точность для анализа функциональных характеристик исследуемой радиолокационной конфигурации.

Результаты

В ходе экспериментальной отладки программно-определяемой FMCW-схемы была проведена спектральная оценка принимаемого сигнала с использованием временных, частотных и водопадных представлений. Анализ выполнялся при размере БПФ 2048 и эффективной полосе наблюдения порядка ± 0.3 МГц.

По данным спектрального отображения (Рис. 3) значения “Max Hold” и “Min Hold” составляют приблизительно -60 дБ и -100 дБ соответственно, что указывает на различие уровней спектра в рассматриваемой экспериментальной конфигурации. Таким образом, эффективный динамический диапазон приема достигает приблизительно 40 дБ, что подтверждает достаточную чувствительность приемного тракта для регистрации слабых отраженных сигналов.

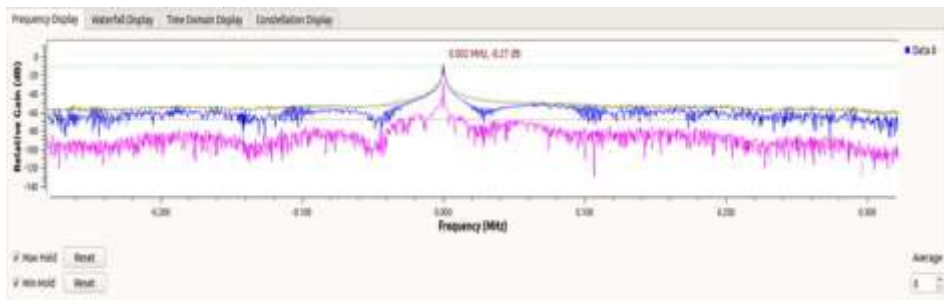


Рисунок 3. Частотное представление принятого сигнала с отображением Max Hold и Min Hold.

Амплитуда основного спектрального пика (Рис. 4) в ходе эксперимента изменялась в диапазоне от -30 дБ до -8 дБ (вариация порядка 22 дБ), что обусловлено изменением условий отражения и положением объекта вблизи антенного модуля. При программном изменении параметра задержки (number delay samples) наблюдалось систематическое смещение спектрального пика, что подтверждает корректность формирования и обработки частотного биения в реализованной FMCW-цепочке.



Рисунок 4. Амплитуды основных спектральных пик.

Водопадное (“Waterfall display”) представление спектра (Рис. 5) использовалось для качественной оценки временной динамики сигнала. При приближении отражающего объекта фиксировалось локальное увеличение спектральной интенсивности, а при его движении – характерные временные флуктуации, связанные с доплеровскими компонентами.

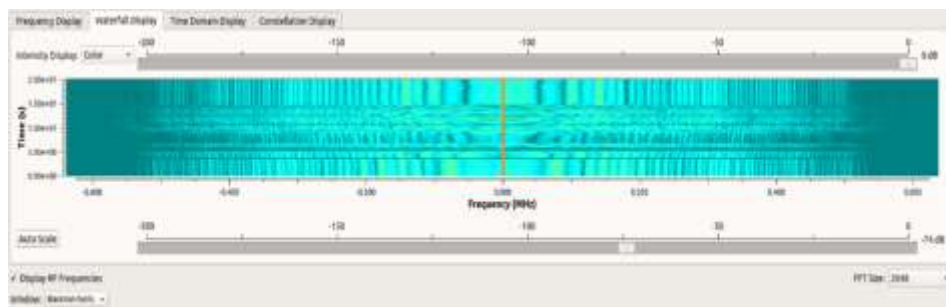


Рисунок 5. Водопадное представление спектра.

В ходе эксперимента программная реализация FMCW-алгоритма формировала численные оценки дальности и скорости на основе частот биений. Следует отметить, что полученные численные значения не могут рассматриваться как абсолютные физические величины, поскольку на них влияют несколько факторов: точность калибровки скорости изменения частоты, параметры усилительного тракта (коэффициенты усиления, линейность), а также наличие паразитных связей между приемным и передающим каналами. Поэтому данные оценки использовались преимущественно для качественного анализа динамики сигнала и проверки работы алгоритма. Данные оценки использовались исключительно для качественной верификации работоспособности алгоритма и анализа динамики отраженного сигнала.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что применение программно-определяемых радиосистем обеспечивает широкие возможности. В ходе экспериментов была зафиксирована разница уровней пиков порядка 22 dB, что подтвердило работоспособность реализованного алгоритма обработки и чувствительность системы к изменениям энергетических характеристик отраженного сигнала. Полученные результаты демонстрируют эффективность использования платформ GNU Radio и USRP как универсальной экспериментальной среды для исследования FMCW-радиолокационных методов и их последующего применения в системах ближнего радиолокационного действия.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Sundaresan S. et al.* Real time implementation of FMCW radar for target detection using GNU radio and USRP // 2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP). IEEE, 2015. PP. 1530–1534.
2. *Jankiraman M.* FMCW radar design. USA: “Artech House”, 2018.
3. *Komarov I., Smolskiy S.* Fundamentals of short-range FM radar. USA: “Artech House”, 2003.
4. *Lin J. et al.* Design of an FMCW radar baseband signal processing system for automotive application // Germany: “SpringerPlus”. Т. 5, № 1, 2016. P. 42.
5. *Marshall H., Koh G.* FMCW radars for snow research // Netherlands: “Cold Regions Science and Technology”. Т. 52, № 2, 2008. PP. 118–131.
6. *Veneruso P. et al.* FMCW Radar-Aided Navigation for Unmanned Aircraft Approach and Landing in AAM Scenarios: System Requirements and Processing Pipeline // Basel: “Sensors”. Т. 25, № 8, 2025. P. 2429.

RESEARCH AND MODELING OF FREQUENCY-MODULATED CONTINUOUS WAVES (LFM, FMCW) IN SOFTWARE-DEFINED RADIO SYSTEMS BASED ON OPEN TOOLS

E. Sivolenko, M. Pinamyan, B. Hovhannisyan
Russian-Armenian University

ABSTRACT

This paper examines frequency-modulated continuous-wave (FMCW) radar technology, which is widely used in modern measurement radar systems. The primary focus is on the software implementation of an FMCW radar using a software-defined radio (SDR) platform based on USRP hardware and the GNU Radio development environment.

The objective of the study is to obtain a functional implementation of an FMCW radar using the block-based architecture of GNU Radio and to experimentally validate its principal radar performance characteristics. FMCW signal generation, reflected signal modeling, and digital signal processing are implemented in this work. The experimental investigation is aimed at analyzing the spectral characteristics of the processed signals. It is shown that the software-defined approach provides high flexibility in configuring the parameters of the LFM (chirp) signal and enables efficient investigation of the influence of bandwidth, frequency sweep duration,

and sampling rate on measurement results. The obtained results confirm the applicability of GNU Radio and USRP as a universal experimental platform for the study of FMCW radar systems and can be used in the development of automotive radars, collision avoidance systems, and other short-range radar applications.

Keywords: Software-defined radio (SDR), functional principles of radar technologies, GNU Radio, digital signal processing (DSP).

DOI 10.24412/1829-0450-fm-2026-1-92-96
УДК 519.688

Поступила: 17.03.2026г.
Сдана на рецензию: 19.03.2026г.
Подписана к печати: 15.04.2026г.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ МНОГОЧАСТОТНОГО РАДАРА НЕПРЕРЫВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ SDR В СРЕДЕ С ОТКРЫТЫМ ИСХОДНЫМ КОДОМ И ИНСТРУМЕНТАРИЯ ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ PYTHON

С.Ж. Оганнесян, Э.Р. Сиволенко

*Российско-Армянский университет
seroj00hovahannisyanyan@gmail.com, eduard.sivolenko@rau.am*

АННОТАЦИЯ

Радиолокационные системы классифицируются по типу зондирующего сигнала, включая непрерывные (CW), частотно-модулированные непрерывные (FMCW), ступенчато-частотные непрерывные (SFCW) и импульсные радары. Выбор сигнала определяет архитектуру системы и методы обработки отраженных сигналов. В данной работе рассматривается многочастотный радиолокатор непрерывной волны (MFCW), основанный на использовании набора дискретных частот для оценки дальности целей по фазовым соотношениям отраженных сигналов. По сравнению с классическими CW- и FMCW-подходами, MFCW обеспечивает повышенную информативность при умеренной сложности реализации и хорошо подходит для экспериментальных исследований. Реализация MFCW-радары выполнена на базе программно-определяемого радио (SDR) с использованием среды GNU Radio и специализированной библиотеки gr-radar, предназначенной для радиолокационной обработки сигналов. Инструментарий gr-radar предоставляет готовые блоки для формирования сигналов, фазовой обработки и оценки дальности, что позволяет реализовать обработку в реальном времени и ускоряет прототипирование системы. Для повышения отношения сигнал/шум в работе применяется согласованная фильтрация, реализуемая в рамках используемого программного инструментария. Такой подход обеспечивает эффективное обнаружение отраженных сигналов при относительно низких вычислительных затратах, что особенно важно для SDR-реализаций радиолокационных систем.

Ключевые слова: GNU Radio, USRP, радар, MFCW, gr-radar.

Введение

Существует 4 основных класса радаров в зависимости от типа передаваемых ими сигналов: непрерывные волны (CW), частотно-модулированные непрерывные волны (FMCW), ступенчато-частотные непрерывные волны

(SFCW) и импульсные волны. В рамках данной работы мы использовали MFCW сигнал – разновидность CW-сигналов. Его главное преимущество перед сигналами CW или FMCW заключается в том, что MFCW позволяет одновременно отслеживать несколько объектов за счет разных частот. В качестве программной среды использовали GNU Radio, поскольку она более доступна довольно широкому сегменту общества и особенно инженерам. Кроме того, GNU Radio легче и гибче, поскольку позволяет импортировать библиотеки через Python. Также следует отметить, что GNU Radio предназначено для работы с сигналами SDR. Одними из важнейших узлов радаров являются фильтры и особенно согласующий фильтр. Основа их работы заключается в том, что отправляется известный сигнал, а отраженный сигнал проверяется на наличие общих элементов выходного сигнала. Этот фильтр улучшает отношение сигнал/шум за счет уменьшения спектральной полосы шума и, кроме того, уменьшает шум в полосе пропускания вейвлета за счет формы спектра вейвлета. Он имеет оптимальную производительность и низкие вычислительные затраты.

Материалы и методы

Как мы уже знаем MFCW-радар (Multi – “Frequency Continuous Waveform”) – это радар непрерывной волны, который работает на нескольких частотах передачи одновременно и использует общую обработку сигнала для эхо-сигналов. Этот тип радара обычно использует спектрограммный анализ полученного эхо-сигнала и смешивает его в основную полосу и, следовательно, способен обнаруживать и разрешать две цели с разными скоростями, но на одинаковом расстоянии.

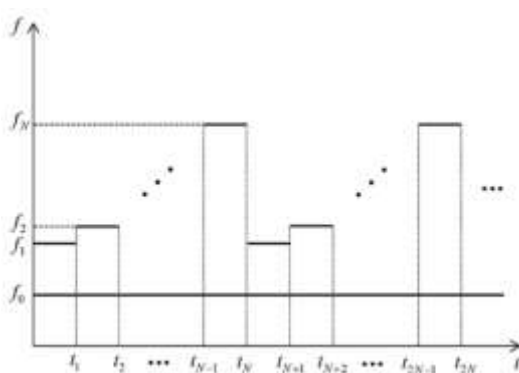


Рис. 1. Частотно-временной график сигнала MFCW.

В отличие от традиционных аппаратно-ориентированных реализаций, в данной работе предлагается программный подход к реализации MFCW-радар на основе библиотеки gr-radar среды GNU Radio. Использование данного инструментария рассматривается как метод программного прототипирования радиолокационных систем с использованием SDR.

Gr-radar представляет собой открытый программный модуль типа Out-of-Tree (OOT) для среды GNU-Radio, предназначенный для генерации и обработки радиолокационных сигналов в системах программно-определяемого радио (SDR). Данный инструментарий разработан с целью ускоренного прототипирования радиолокационных систем и предоставляет набор специализированных функциональных блоков, которые могут быть интегрированы в потоковые схемы (flowgraph) среды GNU Radio.

Библиотека gr-radar включает модули для реализации различных этапов обработки радиолокационных сигналов, таких как формирование зондирующих сигналов, цифровая обработка принимаемых сигналов, анализ фазовой информации, оценка дальности до цели, а также визуализация полученных данных.

Инструментарий построен на модульной архитектуре GNU Radio и поддерживает использование блоков, реализованных на языках Python и C++. Это обеспечивает гибкость при разработке радиолокационных алгоритмов и упрощает интеграцию с SDR-устройствами, такими как устройства семейства USRP. Важной частью является эхотаймер UHD, который позволяет синхронизировать потоки TX и RX, принимаемые от USRP, для обеспечения стабильной фазовой связи при измерениях. Благодаря этому становится возможной реализация обработки сигналов в режиме реального времени.

Основными преимуществами использования gr-radar являются возможность быстрого прототипирования радиолокационных алгоритмов, модульная структура обработки сигналов, совместимость с SDR-платформами и открытый исходный код, позволяющий исследователям модифицировать и адаптировать алгоритмы под конкретные задачи [1,2,3,4,5].

Результаты

На Рис.2 представлена реализованная структура обработки радиолокационного сигнала в среде GNU Radio. В данной конфигурации используются функциональные блоки библиотеки gr-radar, которые обеспечивают формирование многочастотного сигнала, его обработку и последующий анализ отраженных сигналов. Применение данного инструментария позволило построить полный тракт обработки радиолокационных данных в рамках программно-определяемой радиосистемы.

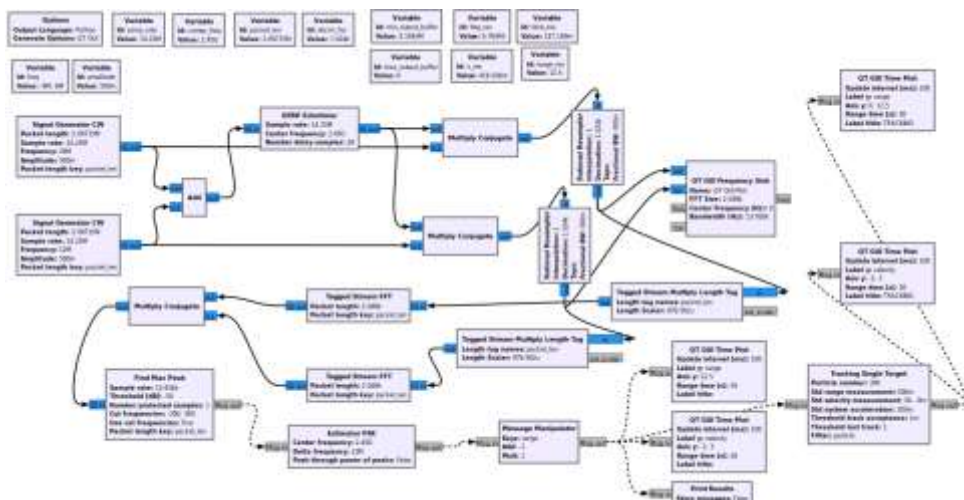


Рис. 2. Кода радара MFCW.

После запуска разработанной программной схемы выполняется обработка принимаемых сигналов и формирование выходных данных, отражающих параметры обнаруженных целей. На Рис. 3 представлены результаты работы системы, полученные в процессе выполнения программы. Данные результаты демонстрируют возможность практической реализации MFCW-радиолокатора с использованием среды GNU Radio и библиотеки gr-radar.

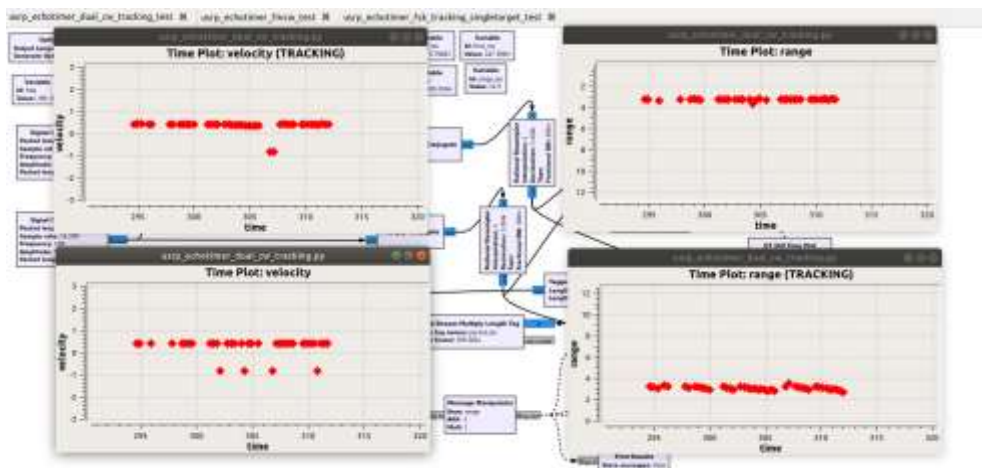


Рис. 3. Полученные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://en.wikipedia.org/wiki/Radar#Configurations>
2. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/radar-signal>
3. <https://www.radartutorial.eu/02.basics/rp33.en.html>
4. <https://www.elprocus.com/matched-filter/>
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Matched_filter#:~:text=The%20matched%20filter%20is%20the,of%20the%20out%2Dgoing%20signal.
6. C. Ryu and C. Lee, "Phase Difference Compensation Method for Range Estimation in an MFCW-CW Radar," *IEEE Access*, vol. 9. PP. 80716–80727, 2021, DOI:10.1109/ACCESS.2021.3084734.
7. <https://www.cgran.org/111980/>
8. gr-radar: GNU Radio Radar Toolbox, GitHub repository. Available: <https://github.com/kitcel/gr-radar>

INVESTIGATION AND IMPLEMENTATION OF A MULTI-FREQUENCY CONTINUOUS WAVE RADAR USING SDR SYSTEMS IN AN OPEN-SOURCE ENVIRONMENT AND THE PYTHON PROGRAMMING TOOLKIT

S. Hovhannisyian, E. Sivolenko

Russian Armenian University

ABSTRACT

Radar systems are classified according to the type of transmitted probing signal, including continuous-wave (CW), frequency-modulated continuous-wave (FMCW), stepped-frequency continuous-wave (SFCW), and pulsed radars. The choice of signal determines the system architecture and the methods used for processing the reflected signals. In this work, a multi-frequency continuous-wave (MFCW) radar is considered, which is based on the use of a set of discrete frequencies to estimate the target range from the phase relationships of the reflected signals. Compared with conventional CW and FMCW approaches, MFCW provides increased informational content with moderate implementation complexity and is well suited for experimental studies. The implementation of the MFCW radar is carried out using software-defined radio (SDR) based on the GNU Radio environment and the specialized **gr-radar** library designed for radar signal processing. The **gr-radar** toolkit provides ready-made blocks for signal generation, phase processing, and range estimation, enabling real-time signal processing and accelerating system prototyping. To improve the signal-to-noise ratio, matched filtering is applied within the utilized software framework. This approach ensures efficient detection of reflected signals with relatively low computational cost, which is particularly important for SDR-based radar implementations.

Keywords: GNU Radio, USRP, radar, MFCW, gr-radar.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

DOI 10.24412/1829-0450-fm-2026-1-97-123

Поступила: 12.02.2026г.

УДК 61:539.2-022.532

Сдана на рецензию: 12.02.2026г.

Подписана к печати: 19.02.2026г.

БИОСОВМЕСТИМЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ СЕРЕБРА КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОТИВООПУХОЛЕВЫЕ АГЕНТЫ

Дж.Г. Тумоян

*Российско-Армянский университет
Институт биомедицины и фармации
Кафедра медицинской биохимии и биотехнологии
julia.tumoyan@rau.am
ORCID:0009-0000-1630-703X*

АННОТАЦИЯ

Онкологические заболевания остаются одной из ведущих глобальных проблем здравоохранения, ежегодно вызывая рост заболеваемости и смертности, что стимулирует поиск новых эффективных и безопасных терапевтических агентов. На фоне стремительного развития нанотехнологий особый интерес вызывает применение наночастиц с уникальными физико-химическими свойствами, позволяющими целенаправленно воздействовать на опухолевые клетки и модифицировать внутриклеточные процессы. Среди них наночастицы серебра (AgNPs) рассматриваются как перспективные противоопухолевые агенты благодаря выраженным цитотоксическим, проапоптотическим и антипролиферативным свойствам. В последние годы значительное внимание уделяется молекулярным механизмам их действия, включающим генерацию активных форм кислорода (АФК) и азота (АФА), нарушение функционирования митохондрий, активацию каспаз, модуляцию ключевых сигнальных путей, денатурацию биополимеров и подавление неоангиогенеза, включая ингибирование HIF-1 α /VEGF-зависимых путей. Биогенный («зеленый») синтез наносеребра позволяет не только повысить биосовместимость AgNPs, но и интегрировать биологически активные фитоконпоненты, усиливая их антипролиферативный и проапоптотический потенциалы. Кроме того, AgNPs демонстрируют выраженный синергизм с химиотерапевтическими препаратами, способствуя преодолению множественной лекарственной устойчивости и повышению эффективности лечения.

В данном обзоре рассматриваются также ограничения, связанные с потенциальной токсичностью, накоплением в тканях и чувствительностью свойств наночастиц к размеру, форме и типу покрытия. Об-

суждаются современные стратегии повышения безопасности и таргетности AgNPs, включая биогенное получение и функционализацию поверхностей. Несмотря на прогресс, применение AgNPs в клинической практике остается ограниченным из-за неполного понимания их фармакокинетики, биотрансформации и токсичности.

Ключевые слова: онкология, нанотехнологии, наночастицы серебра, противоопухолевая активность, молекулярные механизмы.

Введение

За последние пять лет данные Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) и Международного агентства по изучению рака (МАИР) указывают на устойчивый рост глобального бремени онкологических заболеваний. Согласно отчету GLOBOCAN, в 2020г. было зарегистрировано около 19,3 млн новых случаев злокачественных заболеваний и 10 млн смертей [1]. В 2022г. число новых случаев увеличилось до 20 млн, а смертность составила 9,7 млн [2]. Наиболее распространенными остаются рак легкого, молочной железы, колоректальный рак, а также – опухоли печени и желудка [3]. Прогнозы ВОЗ указывают на то, что к 2050г. заболеваемость может достигнуть 35 млн новых случаев, что соответствует росту на 77% по сравнению с 2022г. [4]. Онкологические заболевания продолжают представлять значимую глобальную проблему, обусловленную как медицинскими, так и социально-экономическими факторами. Среди наиболее распространенных локализаций отдельное место занимает рак печени – третья позиция по уровню заболеваемости и смертности [5].

Рак относится к гетерогенным заболеваниям, характеризующимся нарушением регуляции клеточной пролиферации и присущей опухолевым клеткам способностью к инвазии и метастазированию, что может приводить к летальному исходу. В связи с этим раннее выявление и своевременное лечение имеют ключевое значение для снижения распространенности заболевания и уменьшения смертности [6].

Основные методы лечения онкологических заболеваний – хирургическое вмешательство, лучевая терапия, химиотерапия и иммунотерапия, которые применяются как по отдельности, так и в сочетании друг с другом. Хирургическое вмешательство остается ключевым подходом при лечении большинства солидных локализованных опухолей, однако при наличии метастаз требуется дополнительная системная терапия. Лучевая терапия используется у более чем половины пациентов и демонстрирует высокую эффективность, но ее применение ограничено риском острой и отсроченной токсичности. Традиционная химиотерапия также сталкивается с рядом ограничений, включая нестабильность препаратов, низкую растворимость, развитие лекарственной устойчивости, а также – высокая токсичность для здоровых клеток, тканей и органов. Кроме того, системное введение химиопрепаратов затрагивает все соматические клетки, что повышает вероятность генерализованной токсичности [7, 8].

Таким образом, эффективность противоопухолевой терапии часто ограничивается развитием лекарственной устойчивости, которая обусловлена множеством механизмов, включая инактивацию препаратов, модификации их мишеней, уклонение клеток от апоптоза, активный вынос лекарств, восстановление повреждений ДНК, клеточную гетерогенность и избегание иммунного контроля в микроокружении опухоли. Различные транспортные белки, экспрессируемые в различных тканях, способствуют развитию резистентности за счет активного перемещения многочисленных веществ, включая цитостатические препараты, через плазматическую мембрану [9, 10]. Генетическая нестабильность также играет ключевую роль, снижая дифференцировку и созревание клеток, тогда как нарушение контактного ингибирования способствует трансформации доброкачественных новообразований в агрессивные злокачественные формы [11]. Помимо внутриклеточных механизмов, значительный вклад в развитие множественной лекарственной устойчивости (МЛУ) вносят физиологические факторы, связанные с опухолевым микроокружением. Ассоциированные с опухолью фибробласты секретируют защитные цитокины и компоненты внеклеточного матрикса, формируя барьер для проникновения лекарственных средств. Повышенное интерстициальное давление жидкости ухудшает доставку противоопухолевых препаратов в опухолевую ткань, тогда как кислая и гипоксическая микросреда изменяет фармакологическую активность и клеточное поглощение препаратов [12]. Кроме того, изменения в липидном составе и синтезе плазматической мембраны оказывают существенное влияние на формирование фенотипов лекарственной устойчивости, затрудняя внутриклеточный транспорт препаратов и снижая их цитотоксический эффект [13].

Несмотря на значительный прогресс, показатели заболеваемости и смертности от онкологических заболеваний продолжают расти, что подчеркивает необходимость разработки новых, более эффективных и безопасных терапевтических стратегий.

На сегодняшний день нанотехнологии рассматриваются как перспективная стратегия для преодоления ограничений традиционной терапии, в частности за счет повышения специфичности доставки препаратов в целевые участки, улучшения терапевтической эффективности и снижения побочных эффектов [8, 14]. Увеличенная удельная поверхность наночастиц (НЧ) обеспечивает им уникальные свойства, включая возможность биофункционализации и создание эффективного интерфейса для взаимодействия с окружающими тканями. В настоящее время разрабатывается широкий спектр нанопрепаратов и наноматериалов, что делает наномедицину одной из наиболее перспективных областей исследований благодаря ее высокой эффективности и возможности использования меньших доз лекарственных средств [8].

В данном обзоре основное внимание уделено достижениям в области нанотехнологии и подчеркнуты исключительные особенности AgNPs, которые отличают их от традиционных методов лечения, диагностики и визуализации, демонстрируя многообещающие результаты в улучшении прогноза для лечения различных злокачественных заболеваний.

Нанотехнологии – как перспективный подход к преодолению ограничений селективной доставки противоопухолевых препаратов

Недостаточная специфичность и выраженная цитотоксичность, а также развитие МЛУ при применении традиционной химиотерапии и иммунотерапии остаются одними из ключевых факторов, ограничивающих эффективность лечения онкологических заболеваний. В связи с этим в последние годы значительное внимание уделяется развитию наноонкологии – современной междисциплинарной области, направленной на использование НЧ для диагностики, таргетного воздействия и терапии злокачественных новообразований [15].

Применение наноматериалов позволяет создавать функционализированные платформы, которые могут одновременно выступать в роли как диагностических, профилактических, так и терапевтических агентов, открывая новые возможности для персонализированной медицины. Наноонкология продемонстрировала многообещающие результаты как в преклинических, так и в клинических испытаниях и зарекомендовала себя как инновационный метод терапии различных заболеваний благодаря высокой специфичности и эффективности при различных типах опухолей [16].

Современные нанотехнологические стратегии, разрабатывающие системы наномасштабной доставки лекарственных веществ, обеспечивают точное нацеливание опухолевых клеток при одновременной минимизации токсических эффектов. Благодаря биосовместимости и малым размерам наноматериалы способны эффективно преодолевать биологические барьеры, что делает их мощным инструментом в онкотерапии [17].

Наноматериалы, в том числе НЧ, все шире применяются в медицине благодаря своим специфическим физико-химическим характеристикам, высокой стабильности и выраженным термическим и фотохимическим свойствам. Среди НЧ благородных металлов особое внимание привлекают AgNPs. Благодаря малым размерам (<100 нм), большому отношению площади поверхности к объему и повышенной реакционной способности такие НЧ обладают уникальными свойствами, которые делают их перспективными кандидатами для использования в качестве противоопухолевых агентов [18].

В нанотехнологии синтез НЧ может быть осуществлен различными методами, включая химические, физические и биологические подходы. В последние годы особую популярность приобрел метод «зеленого», или биоген-

ного синтеза, представляющий собой экологически безопасную и устойчивую стратегию получения НЧ без применения токсичных растворителей и опасных химических реагентов. В рамках таких биологических процессов в качестве природных источников широко используются растения и микроорганизмы. Биогенный синтез обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами, а именно: низкая стоимость, высокая масштабируемость, сопровождается минимальным образованием опасных отходов и позволяет получать наноматериалы, подходящие для промышленного применения. Кроме того, этот подход обеспечивает формирование НЧ с разнообразными морфологическими характеристиками, размерами и свойствами поверхности, что позволяет адаптировать их под конкретные области применения. В качестве биологических компонентов, участвующих в синтезе и выполняющих функцию катализаторов, восстановителей, стабилизаторов или формообразующих агентов, могут использоваться полифенолы, флавоноиды, алкалоиды и терпеноиды, которые восстанавливают ионы Ag^+ до Ag и стабилизируют полученные наночастицы [19–22].

Хотя многие цитостатические препараты обладают высокой противоопухолевой активностью, их эффективность часто ограничена чувствительностью тканей и развитием токсических эффектов, включая повреждение здоровых клеток. В связи с этим в ряде исследований изучались различные типы наноматериалов – липосомы, полимерные носители, функционализированные молекулы и антитела – и было показано, что их комбинированное использование позволяет достичь оптимального баланса между терапевтической эффективностью и снижением токсичности [23]. В отличие от классических противоопухолевых подходов, НЧ обеспечивают более селективную доставку терапевтических агентов, что способствует уменьшению системного токсического воздействия и выраженности побочных эффектов. Кроме того, наночастичные системы доставки лекарственных средств характеризуются улучшенными фармакокинетическими свойствами, повышенной точностью нацеливания и способностью преодолевать механизмы множественной лекарственной устойчивости опухолевых клеток [15]. Тем не менее потенциальная токсичность наноматериалов остается важным ограничивающим фактором, и для их широкого внедрения в клиническую онкологическую практику требуются дальнейшее углубленное исследование и оптимизация [6, 24].

По сравнению с традиционными методами противоопухолевой терапии таргетная нанотерапия демонстрирует повышенную эффективность, обусловленную минимальным системным воздействием, улучшенной проницаемостью и удержанием в опухолевых тканях. Реализация данного подхода сопровождается увеличением периода полувыведения наночастиц из плазмы и изменением их биораспределения, что способствует селективному накоплению наноматериалов

в опухолевых очагах [25]. Продление времени циркуляции НЧ связано с превышением их размера порога почечной экскреции, что ограничивает их быструю элиминацию из организма. Дифференциальное накопление в опухолевых тканях обеспечивает более высокую локальную концентрацию НЧ по сравнению с плазмой и здоровыми органами, причем этот процесс зависит от времени и может воспроизводиться независимо от размера опухоли. Совокупность указанных свойств позволяет таргетной нанотерапии обеспечивать пролонгированный терапевтический эффект, повышая результативность фармакологического воздействия за счет синергии между длительным присутствием препарата в опухолевой ткани и поддержанием его оптимальной концентрации в системном кровотоке, что открывает перспективы для более точного и безопасного лечения онкологических заболеваний [16, 26].

Общие требования к наночастицам как платформам доставки лекарственных средств

Для разработки эффективных платформ противоопухолевой терапии, НЧ должны обладать рядом ключевых свойств, включая биосовместимость, высокую биодоступность и стабильность в физиологических условиях. Кроме того, они должны обеспечивать селективное воздействие на опухолевые клетки, минимизируя повреждение здоровых тканей, и эффективно высвобождать терапевтическое средство непосредственно в целевом участке. Реализация этих требований во многом определяется физико-химическими характеристиками НЧ, используемых в качестве носителей лекарственных препаратов [8].

Размер наночастиц оказывает ключевое влияние на их эффективность в противоопухолевой терапии. За счет повышенной проницаемости сосудистой стенки опухолей, размер частиц можно оптимизировать таким образом, чтобы они были достаточно малы для проникновения в опухоль, но при этом достаточно крупны, чтобы предотвращать экстравазацию из нормальных кровеносных сосудов и неконтролируемое накопление в здоровых тканях. Однако поглощение НЧ различными органами сильно отличается, что требует тщательного подбора их физических характеристик. Многочисленные исследования показали, что НЧ меньшего размера (<50 нм) демонстрируют более высокую противоопухолевую активность по сравнению с крупными частицами, что обусловлено их улучшенной способностью к проникновению и накоплению в опухолевых тканях [8, 27].

Еще одним ключевым параметром НЧ при их проектировании для противоопухолевой терапии является форма, поскольку она влияет на гидродинамику, взаимодействие с клеточными мембранами и фармакокинетику. Форма частиц может определять их захват ретикулоэндотелиальной системой (РЭС), что представляет значительное препятствие для клинического

применения, поскольку клетки РЭС, в частности в печени, удерживают большую часть введенной дозы, снижая биодоступность препарата и повышая иммуногенность и токсичность. Одним из возможных подходов к решению этой проблемы является временное подавление активности клеток РЭС, что позволяет перенаправить НЧ в опухолевые очаги без необходимости использования специфических лигандов, повышая эффективность доставки терапевтических средств [8, 28, 29].

Молекулярные механизмы противоопухолевого действия наночастиц серебра

Растущий интерес к AgNPs связан с их потенциалом выступать в роли альтернативных противоопухолевых агентов. Согласно данным литературы, AgNPs проявляют выраженную цитотоксическую активность в отношении широкого спектра опухолевых клеток. Наиболее изученными моделями являются клетки рака молочной железы (ZR-75, MCF-7, SKBR3 и 8701-BC), клеточные линии лейкемии, а также клетки опухолей толстой кишки (HT-29, HCT116 и Caco-2). В этих моделях НЧ вызывают снижение жизнеспособности клеток, нарушение пролиферации и запуск апоптотических механизмов, что подтверждает их потенциальную терапевтическую значимость [18, 30–32].

AgNPs демонстрируют выраженные противоопухолевые свойства, проявляясь в способности замедлять пролиферацию и прогрессирование злокачественных клеток. Механизм данного эффекта связывают с их влиянием на регуляторные сигнальные каскады, которые играют ключевую роль в онкогенезе, клеточном росте, выживании и инвазии опухолевых клеток. Анализ накопленных экспериментальных данных показывает, что AgNPs способны индуцировать широкий спектр цитотоксических изменений: от усиления оксидативного стресса и нарушения митохондриального метаболизма до активации апоптотических и аутофагических процессов. Такое многоуровневое воздействие приводит к подавлению жизнеспособности опухолевых клеток и ограничению дальнейшего развития опухолевой ткани. Важной особенностью является то, что в ряде исследований отмечается относительно низкая токсичность AgNPs для нормальных клеток. Это потенциально обеспечивает селективность действия и указывает на перспективность использования AgNPs в качестве компонента противоопухолевых стратегий, включая комбинированную терапию [33].

Механизм противоопухолевого действия AgNPs реализуется через несколько взаимосвязанных механизмов, включающих индукцию запрограммированной клеточной смерти, нарушение регуляции клеточного цикла, повреждения биополимеров и деструкции мембранных структур, а также окислительного стресса (Рис. 1).

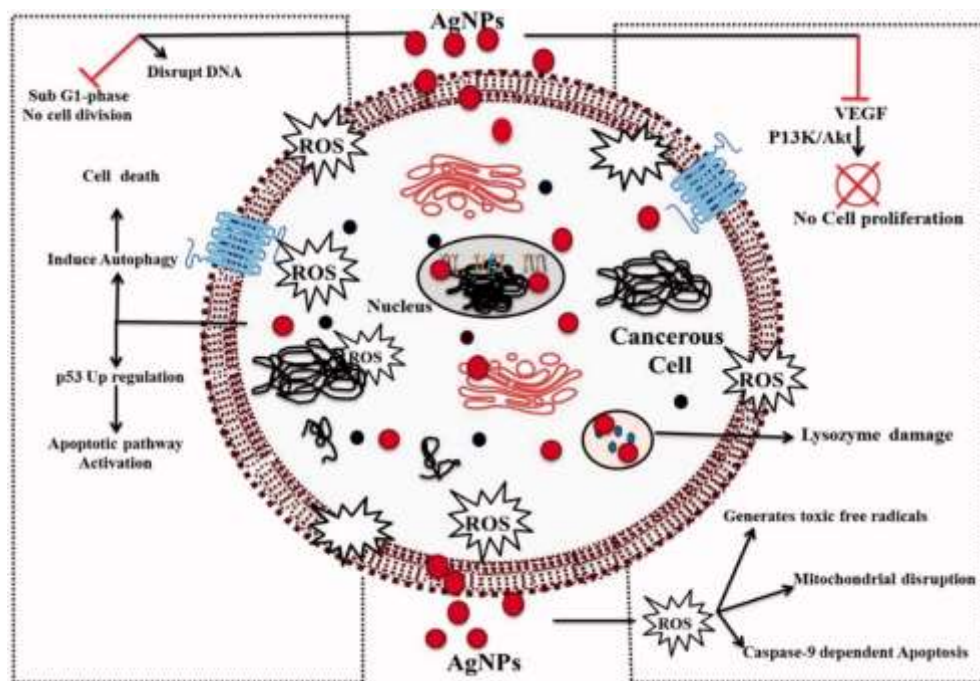


Рисунок 1. Схематическое представление механизмов противоопухолевой активности наночастиц серебра [33].

Разнообразие молекулярных механизмов, лежащих в основе биологической активности AgNPs, обусловило их растущее значение в разработке и оценке новых противоопухолевых терапевтических подходов. Благодаря способности воздействовать на ключевые сигнальные пути, регулирующие пролиферацию, апоптоз и клеточный стресс, AgNPs рассматриваются как перспективные адъюванты и самостоятельные агенты в онкотерапии.

Токсические свойства AgNPs и высвобождаемых ими ионов серебра представляют значительный интерес для противоопухолевых исследований, поскольку они способны подавлять клеточную пролиферацию, вызывать повреждение ДНК, усиливать окислительный стресс и нарушать целостность клеточных мембран. Важную роль при этом играют физико-химические характеристики НЧ, определяющие эффективность их клеточного поглощения и кинетику высвобождения ионов серебра, что напрямую влияет на выраженность противоопухолевых эффектов. Поэтому контроль параметров AgNPs на этапе синтеза является критически важным для достижения оптимального уровня цитотоксичности в соответствии с терапевтическими задачами [34].

Далее описаны основные молекулярные пути, участвующие в противоопухолевой активности AgNPs.

1. Индукция запрограммированной клеточной смерти

AgNPs обладают широким спектром биологических эффектов, включая запуск различных апоптотических путей. Показано, что AgNPs могут активировать внешний каскад апоптоза, основанный на взаимодействии рецепторов смерти (таких, как Fas, TNFR1, TNFR2, а также TRAIL-рецепторов DR4 и DR5) с их специфическими лигандами (FAS-L, TRAIL или TNF). Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что обработка клеток наночастицами приводит к значительному повышению уровней экспрессии FAS и FADD – ключевых молекул, участвующих в активации внешнего (рецепторопосредованного) пути апоптоза. Это взаимодействие приводит к активации инициаторных каспаз-8 и -10, что запускает дальнейшее распространение проапоптотического сигнала (Рис.1) [15, 35]. AgNPs активируют апоптоз и посредством модуляции экспрессии генов, включая p53, и воздействия на сигнальные пути, регулирующие гибель клетки. Некротическая клеточная смерть также может развиваться вследствие прямого структурного повреждения клеточных компонентов [33]. Ряд исследований продемонстрировал также, что AgNPs существенно влияют на регуляцию белков семейства Bcl-2, нарушают митохондриальные функции и инициируют активацию каспаз. Ключевым пусковым механизмом данного апоптотического пути считается повреждение ДНК, сопровождающееся ее фрагментацией и конденсацией хроматина, что, вероятно, обусловлено усиленной генерацией АФК [36]. В случае, если после индуцированного повреждения ДНК не происходит ее репарации, и восстановление прогрессии клеточного цикла оказывается невозможным, белок p53, функционирующий как транскрипционный фактор, инициирует экспрессию проапоптотических генов. К числу таких мишеней относятся проапоптотические представители семейства Bcl-2, включая Bax, а также белки, содержащие исключительно BH3-домен, такие как Bim, Bid, PUMA, Noxa и Bad.

В литературных данных ранее описаны исследования, что AgNPs приводят к снижению экспрессии ряда белков, участвующих в процессах репарации и репликации ДНК, включая Fen-1, XRCC1, Pol-β, Pol-ε, DNA-ПКcs, NF-κB, Торо Па, MRE11, RFC-1, PCNA, хеликазу и RPA. Кумулятивное нарушение данных механизмов сопровождалось выраженным повреждением ДНК, что подтверждалось повышением уровня фосфорилированного гистона γ-H2AX – характерного маркера ДНК-повреждений. В результате активация p53 способствовала запуску апоптотического каскада. Одним из ключевых последующих этапов p53-зависимого ответа является индукция экспрессии Bax и функционально родственных белков. Bax взаимодействует с внешней мембраной митохондрий, формируя поры и вызывая митохондриальную дисфункцию, что приводит к необратимому повреждению митохондрий и активации митохондриального пути апоптоза [15,37,38]. Повышение экспрессии

проапоптотических белков Вах и PUMA – ключевого модулятора р53-зависимого апоптоза – в сочетании со снижением уровней антиапоптотических белков Bcl-2 и Bcl-xL приводит к нарушению баланса между про- и антиапоптотическими членами семейства Bcl-2, что инициирует активацию митохондриально-опосредованного пути апоптоза. Модуляция активности данных белков сопровождается развитием митохондриальной дисфункции, проявляющейся, в частности, нарушением синтеза АТФ. Помимо митохондриального повреждения, обусловленного окислительным стрессом и изменением регуляции белков семейства Bcl-2, предполагается, что AgNPs способны непосредственно взаимодействовать с митохондриями. При этом их биологический эффект может носить частицеспецифичный характер, либо быть связан с ингибированием митохондриальных ферментов, критически важных для нормального функционирования органелл [15, 39].

Активация внешнего и внутреннего путей апоптоза считается наиболее изученным механизмом, лежащим в основе антипролиферативного и противоопухолевого действия перспективных терапевтических агентов. Однако апоптоз может запускаться и через другие клеточные механизмы. Одним из таких процессов является стресс эндоплазматического ретикулума (ЭР), возникающий в условиях дефицита питательных веществ, воздействия лекарственных веществ, окислительного стресса, а также при накоплении мутантных или неправильно свернутых белков. Эти нарушения активируют реакцию на несвернутые белки (UPR), которые в норме выполняют защитную функцию и поддерживают клеточный гомеостаз. При длительном или интенсивном воздействии стресс ЭР приводит к апоптотической гибели клетки. Реакция UPR регулируется тремя ключевыми трансмембранными белками: IRE1, PERK и ATF6, выступающими сенсорами стресса ЭР и находящимися в неактивном состоянии при нормальных условиях. Ряд исследований демонстрирует, что усиление ЭР-стресса и изменения экспрессии этих сигнальных белков могут являться важными механизмами противоопухолевого действия AgNPs [40].

Кроме того, наносеребро может блокировать работу натриевых и калиевых ионных каналов мембраны, вызывая нарушение мембранного потенциала. Оно также способно взаимодействовать с сульфгидрильными группами (-SH) мембранных белков, что приводит к ухудшению барьерной функции мембраны и нарушению обменных процессов. Эти эффекты вызывают выраженные повреждения мембраны и могут приводить к прямому некрозу клеток [41].

2. Нарушение клеточного цикла

Остановка клеточного цикла под действием AgNPs является одним из наиболее изученных механизмов их противоопухолевой активности. Первоначально было установлено, что обработка AgNPs приводит к усиленному образо-

ванию нитрита и увеличению генерации АФК. В дальнейшем выявлено, что повышенные уровни оксида азота (NO) и АФК вызывают деполяризацию митохондриального мембранного потенциала и приводят к остановке клеточного цикла (преимущественно на стадии G2/M) что связано с индуцированным повреждением ДНК [42]. Известно, что AgNPs, Ag⁺ способны индуцировать двухцепочечные разрывы ДНК, а также увеличивать долю клеток в фазе субG0/G1, что указывает на развитие апоптоза [43]. Ряд исследований демонстрирует влияние AgNPs на экспрессию ключевых регуляторных белков, контролирующих клеточный цикл. Особое внимание уделяется транскрипционному фактору p53 – одному из наиболее изученных супрессоров опухолевого роста, который играет критическую роль в ответе на повреждение ДНК, процессах ее репарации, регуляции метаболизма, аутофагии, клеточного старения и инициировании программируемой клеточной смерти (Рис. 2) [44].

AgNPs способны взаимодействовать с рецепторами мембранных белков, активируя внутриклеточные сигнальные каскады и тем самым подавляя пролиферативную активность клеток. Вступая в прямой контакт с макромолекулярными компонентами клетки, AgNPs оказывают влияние на ключевые процессы клеточного метаболизма [45]. AgNPs модулируют активность различных сигнальных физиологических путей, подавляя или активируя их, что вызывает ранний апоптоз или замедляет интенсивное деление опухолевых клеток. Кроме того, в ряде исследований показано, что AgNPs способны активировать p53, каспазу-3 и p-Erk1/2, что инициирует каскад внутриклеточных событий, приводящих к апоптозу и контролю клеточного цикла [46]. Литературные данные указывают на выраженное снижение экспрессии циклинов E1, B1 и A2 под действием AgNPs. Комплексы Cdc2 (CDK1)/CDK2 в ассоциации с циклином A2 играют ключевую роль в переходе клеток из S-фазы в G2-фазу клеточного цикла. Активность данных комплексов находится под отрицательным контролем белков семейства Cip/Kip, включая p21 и p27, а также контрольных киназ клеточного цикла, таких как Chk1, уровни которых существенно снижались после воздействия AgNPs [47]. В то же время экспрессия Chk2 демонстрировала парадоксальное повышение, что, вероятно, отражает активацию компенсаторных сигнальных механизмов в ответ на индуцированный стресс. Циклин-зависимые киназы являются нижележащими мишенями фосфатазы Cdc25A, обеспечивающей их активацию и поддержание прогрессии клеточного цикла; при этом уровень Cdc25A также значительно снижался после применения наночастиц. Совокупность указанных изменений, наряду с модуляцией экспрессии других белков, вовлеченных в процессы репарации ДНК, способствовала ингибированию пролиферации опухолевых клеток и приводила к остановке клеточного цикла на стадии S-фазы [15].

Полученные данные указывают на то, что вмешательство AgNPs в механизмы регуляции клеточного цикла (Рис. 2) играет ключевую роль в формировании их антипролиферативного и противоопухолевого потенциалов. В этой связи актуальным представляется дальнейшее систематическое изучение молекулярных механизмов их действия, включая взаимодействие с основными сигнальными путями, контролирующими клеточную пролиферацию, апоптоз и выживание клеток, такими как p53/p21, циклин-зависимые киназы (CDKs), MAPK/ERK и PI3K/Akt [15]. Расширение представлений о данных взаимодействиях позволит более полно охарактеризовать терапевтический потенциал AgNPs и обосновать перспективы их применения в противоопухолевой терапии.

Совокупность результатов исследований последних лет свидетельствует о многоуровневом и комплексном характере механизмов, посредством которых AgNPs способны индуцировать гибель опухолевых клеток.

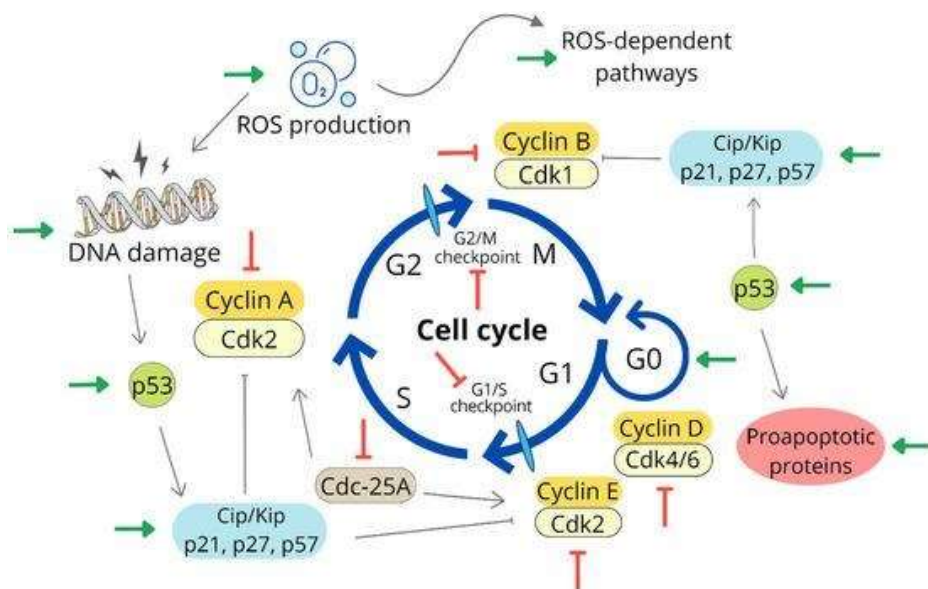


Рисунок 2. Регуляция клеточного цикла под воздействием наночастиц серебра: зеленые стрелки отражают процессы, которые активируются AgNPs; красные – сигнальные пути, подавляемые AgNPs [44].

3. Окислительный стресс

Реактивные формы кислорода являются ключевыми сигнальными молекулами, участвующими в регуляции клеточной сигнализации и поддержании редокс-гомеостаза. Их образование в клетках связано с активностью оксидаз и процессами возбуждения и одновалентного восстановления молекулярного

кислорода, что приводит к генерации супероксид-аниона, перекиси водорода и гидроксильных радикалов. Помимо кислородсодержащих свободных и несвободных радикалов, в клетках присутствуют реактивные соединения азота, а также металлов переменной валентности – таких, как железо (Fe) и медь (Cu), и серосодержащие реактивные соединения. Эти молекулы способны усиливать образование АФК и индуцировать развитие окислительного стресса, что в конечном итоге приводит к нарушению окислительно-восстановительного баланса клетки. Окислительный стресс развивается в результате дисбаланса между процессами генерации активных форм кислорода и механизмами их нейтрализации в клетке [48].

Помимо прооксидантного действия самих НЧ, образование АФК может инициироваться эндогенно, при этом митохондрии выступают основной клеточной мишенью окислительного стресса, индуцированного наночастицами. После проникновения наночастиц в митохондрии наблюдается усиленная генерация АФК, обусловленная нарушением цепи переноса электронов, структурными повреждениями органеллы, активацией НАДФН-зависимых ферментных систем и деполяризацией митохондриальной мембраны. Воздействие AgNPs приводит к митохондриальной дисфункции (нарушение митохондриальной цепи переноса электронов), что сопровождается повышенной генерацией АФК, которые повреждают важные биомолекулы, включая ДНК, белки и липиды. Объем продуцируемых АФК во многом определяется типом клетки, уровнем ее метаболической активности (включая число митохондрий), особенностями окислительно-восстановительного микроклимата, а также рядом других биологических и средовых факторов [48].

После проникновения в биологические среды AgNPs подвергаются окислению молекулярным кислородом и другими компонентами, в результате чего металлическое серебро переходит в ионную форму. Образующиеся Ag^+ активно взаимодействуют с сульфгидрильными группами (-SH) серосодержащих белков и пептидов – таких, как глутатион (GSH), тиоредоксин (TXN), тиоредоксинпероксидаза (TPX) и супероксиддисмутаза (СОД) – формируя стабильные связи с атомами серы и азота. Нарушение структуры белков включает и инактивацию IRP-1, сопровождающуюся распадом Fe-S кластеров, высвобождением железа и модификацией -SH-групп, что дополнительно усиливает клеточный дисбаланс. Это приводит к изменению структуры и функции данных белков. По мере связывания значительных количеств Ag^+ антиоксидантная ферментативная система утрачивает способность нейтрализовать окислительный стресс. Взаимодействие оксида азота (NO) с супероксидом приводит к образованию реактивных форм кислорода и азота (АФКА), которые обладают особенно выраженным цитотоксическим действием [22, 49]. Снижение скорости пролиферации, повреждение органелл, биополимеров, в конечном итоге приводит к гибели клетки. Исследования внутриклеточной продукции АФКА подтвердили, что она является

важнейшим признаком токсичности, вызванной НЧ, и может рассматриваться как первый шаг в каскадах токсичности и запрограммированной клеточной смерти [21].

4. Ингибирование неоангиогенеза, предотвращение роста опухолей и малигнизация

Ангиогенез, процесс формирования и поддержания структуры кровеносных сосудов, играет ключевую роль в снабжении опухолей кислородом и питательными веществами в ходе их прогрессирования и метастазирования. На сегодняшний день идентифицировано множество сигнальных молекул, стимулирующих опухолевый ангиогенез, среди которых фактор роста эндотелия сосудов А (VEGF-A, также известный как VEGF) и его рецептор VEGFR-2 выступают основными активаторами этого процесса. Тем не менее, до настоящего времени стандартные подходы антиангиогенной терапии в основном сосредоточены на подавлении сигнального пути VEGF/VEGFR-2 [50].

Разработаны несколько классов антиангиогенных препаратов, включая моноклональные антитела (например, бевацизумаб), белковые конструкции (такие, как афлиберцепт и Эндостар) и ингибиторы тирозинкиназ, например, сунитиниб и сорафениб. Однако клиническое применение этих средств ограничено рядом факторов, включая побочные эффекты, токсичность, развитие приобретенной лекарственной устойчивости и отсутствие надежных биомаркеров [51]. В этой связи НЧ рассматриваются как новое поколение терапевтических агентов, объединяющих преимущества малых молекул – стабильность и высокую биодоступность – с высокой специфичностью и эффективностью доставки.

AgNPs подавляют образование новых кровеносных сосудов, необходимых для роста опухолей, посредством воздействия на ангиогенные факторы. Их антиангиогенные эффекты обусловлены способностью вмешиваться в ключевые этапы VEGF-опосредованного ангиогенеза. В частности, показано, что AgNPs снижают экспрессию гипоксия-индуцируемого фактора (HIF-1 α) в опухолевых клетках, что приводит к уменьшению продукции VEGF и ослаблению паракринной стимуляции эндотелиальных клеток [52]. Кроме того, AgNPs непосредственно нарушают VEGF-зависимую передачу сигнала в эндотелиальных клетках за счет ингибирования активации рецептора VEGFR2 и последующего подавления внутриклеточных каскадов PI3K/АКТ и MAPK/ERK, критически важных для пролиферации, миграции и тубулогенеза эндотелия [53, 54]. Дополнительно AgNPs индуцируют окислительный стресс и цитоскелетную дестабилизацию в эндотелиальных клетках, что сопровождается снижением активности FAK (focal adhesion kinase) и нарушением адгезионно-миграционных процессов, необходимых для ангиогенного

ответа [55]. Совокупность этих эффектов приводит к выраженному угнетению неоангиогенеза и ограничению опухолевого роста вследствие уменьшения снабжения тканей кислородом и питательными веществами [56, 57].

Наночастицы в иммунотерапии онкологических заболеваний

Использование НЧ в иммунотерапии онкологических заболеваний рассматривается как перспективная и инновационная платформа, обусловленная их способностью повышать эффективность доставки терапевтических агентов, обеспечивать селективное нацеливание на опухолевые клетки и модулировать иммунный ответ. Наночастицы способны реализовывать как пассивные, так и активные механизмы таргетирования. Пассивное нацеливание основано на эффекте повышенной проницаемости и удержания (EPR), обусловленном наличием пор в опухолевых сосудах размером приблизительно 100–800 нм, что способствует проникновению и накоплению наночастиц в опухолевой ткани. В свою очередь, активное таргетирование достигается путем функционализации поверхности наночастиц лигандами, способными специфически связываться с рецепторами, сверхэкспрессируемыми на поверхности опухолевых клеток, что повышает селективность и точность доставки [12, 58]. Для реализации активного нацеливания применяются различные опухолеспецифические лиганды, включая моноклональные антитела, пептиды (например, RGD), фолат, трансферрин и аптамеры. Помимо прямого воздействия на опухолевые клетки, НЧ способны взаимодействовать с иммунными клетками, инициируя каскады иммунных реакций и модулируя опухолевое микроокружение (tumor microenvironment, TME), что способствует усилению противоопухолевого иммунного ответа [12].

Микроокружение опухоли представляет собой сложную динамическую систему, включающую иммунные клетки, эндотелиальные клетки, компоненты внеклеточного матрикса и сигнальные молекулы, которые играют ключевую роль в росте опухоли, ее прогрессировании и формировании лекарственной резистентности. В этой связи разработка систем адресной доставки лекарственных средств, способных эффективно взаимодействовать с компонентами TME, рассматривается как перспективная стратегия противоопухолевой терапии. Иммунные клетки, такие как макрофаги, нейтрофилы и лимфоциты, активно рекрутируются в микроокружение опухоли под действием хемокинов и цитокинов, секретируемых опухолевыми и стромальными клетками. Среди них особое значение имеют опухоль-ассоциированные макрофаги (TAM), которые характеризуются выраженной фенотипической и функциональной пластичностью и способны дифференцироваться в провоспалительный M1- или противовоспалительный M2-фенотип в зависимости от сигналов микроокружения. Макрофаги M1 играют важную роль в реализации

противоопухолевого иммунного ответа, осуществляя прямую цитотоксичность за счет продукции активных форм кислорода и оксида азота, а также опосредованно активируя естественные киллеры и цитотоксические Т-лимфоциты через секрецию провоспалительных цитокинов, включая интерферон- γ и TNF- α . Кроме того, M1-макрофаги способствуют активации адаптивного иммунного ответа посредством презентации антигенов и секреции цитокинов, таких как IL-12 и TNF- α , стимулирующих пролиферацию и дифференцировку Т-клеток. Напротив, в опухолевом микроокружении, как правило, доминируют макрофаги M2-фенотипа, которые подавляют противоопухолевую активность M1-клеток и способствуют прогрессированию опухоли за счет секреции иммуносупрессивных факторов, включая IL-10 и TGF- β . Для модуляции иммунного ответа и подавления роста опухоли были предложены различные иммунотерапевтические агенты, включая моноклональные антитела, малые молекулы, пептиды и белки, однако клиническое применение этих средств существенно ограничено низкой адресностью, недостаточной проницаемостью в опухолевую ткань и их захватом фагоцитирующими клетками. В этом контексте наночастицы рассматриваются как эффективный инструмент для преодоления указанных ограничений. В частности, было показано, что AgNPs способны индуцировать поляризацию опухоль-ассоциированных макрофагов в M1-подобный фенотип за счет повышения продукции АФК и азота, что способствует усилению противоопухолевого иммунного ответа [12, 58–61].

Серебряные наночастицы в комбинированной терапии

Для повышения терапевтической эффективности в клинической онкологии химиотерапевтические средства нередко применяются в комбинированных схемах. В таких случаях подбирают препараты, обладающие синергетическим действием и воздействующие на различные молекулярные мишени опухолевых клеток, что обеспечивает более выраженное подавление неопластического роста. Несмотря на доказанный противоопухолевый потенциал AgNPs в условиях *in vitro* и *in vivo*, наиболее перспективным направлением их клинического использования считается включение в комбинированные терапевтические режимы совместно с классическими химиопрепаратами или как адъювант при других модальностях лечения онкологии. В связи с этим в литературе представлено множество исследований, анализирующих клеточные эффекты AgNPs как в моноприменении, так и в сочетании с различными противоопухолевыми средствами [62].

Терапевтический потенциал AgNPs обусловлен их специфическим механизмом индукции гибели клеток. Несмотря на вариабельность физических и химических характеристик AgNPs (включая размер, морфологию и тип по-

верхностного покрытия) их противоопухолевое действие реализуется преимущественно через общий, достаточно консервативный путь. После проникновения в клетку, как правило, посредством эндоцитоза, AgNP накапливаются в эндосомах, которые впоследствии сливаются с лизосомами. Кислая среда лизосом ускоряет высвобождение ионов серебра, которые дестабилизируют клеточный гомеостаз и, в зависимости от молекулярно-биологических особенностей данной клеточной линии, инициируют каскады апоптоза. Такой путь цитотоксичности часто описывают как «механизм троянского коня», подчеркивая, что разрушительное действие AgNPs реализуется преимущественно после их внутреннего захвата клеткой [62, 63].

AgNPs демонстрируют выраженный потенциал в усилении эффективности различных противоопухолевых подходов, включая химиотерапию, лучевую терапию, иммунотерапию, фототермическую и фотодинамическую терапию (ФДТ), а также мультимодальные методы лечения. Благодаря высокому отношению площади поверхности к объему и большим возможностям для функционализации, AgNPs выступают перспективными носителями лекарственных соединений в комбинированных стратегиях доставки химиотерапевтических средств. Это позволяет инкапсулировать AgNPs в стимул-чувствительные наноносители или конъюгировать с ними противораковые препараты, обеспечивая повышенное внутриклеточное накопление, обход транспортеров эффлюкса и подавление их активности. Такие системы обеспечивают контролируемое и селективное высвобождение лекарства непосредственно в опухолевой ткани, способствуя преодолению МЛУ [64, 65].

AgNPs способны существенно усиливать эффективность традиционных противоопухолевых подходов за счет улучшения доставки лекарств, преодоления механизмов лекарственной резистентности, радиосенсибилизации, активации устойчивых к стандартной терапии опухолей, стимуляции противоопухолевого иммунного ответа, реализации светочувствительной цитотоксичности и формирования многофункциональных платформ, объединяющих различные терапевтические методы [66]. Дальнейшее совершенствование онкологической терапии, направленное на снижение системной токсичности, повышение фармакологической активности препаратов и преодоление клинической проблемы устойчивых к терапии опухолей, будет опираться на комплексные преимущества применения AgNPs [65].

Способность AgNPs снижать уровень внутриклеточного глутатиона и нарушать работу АТФ-зависимых транспортеров также делает их эффективными сенсибилизаторами опухолевых клеток к таким химиопрепаратам, как доксорубин, цисплатин и паклитаксел [35]. Кроме того, конъюгация AgNPs с клеточно-проникающими пептидами или специфичными лигандами повышает таргетность доставки и усиливает избирательное воздействие на опухолевые клетки. Особые свойства делают AgNPs перспективными агентами для

онкотерапии, особенно при их интеграции в системы целевой доставки лекарственных препаратов. Разработка платформ на основе AgNPs, направленных на конкретные ткани или опухолевые клетки, открывает новые возможности для повышения эффективности лечения. Кроме того, продолжаются исследования взаимодействия наночастиц с индивидуальными генетическими маркерами пациентов, что позволяет улучшать точность и результаты противоопухолевой терапии [67].

Комбинированное применение AgNPs вместе с традиционными противоопухолевыми химиотерапевтическими препаратами обеспечивает синергетическое воздействие на опухолевые клетки, что представляет собой важную стратегическую потребность в химиотерапии с учетом таких факторов, как токсичность, эффективность, терапевтический индекс, фармакокинетика, дозировка и таргетная доставка препаратов. Дополнительно, использование подхода «зеленого» синтеза наночастиц обеспечивает дополнительное преимущество за счет интеграции биологически активных соединений из лекарственных растений с известными противоопухолевыми свойствами, что расширяет возможности терапии онкологических заболеваний.

Результаты исследований, посвященных комбинированной терапии с использованием AgNPs и химиотерапевтических препаратов, подтверждают целесообразность одновременного применения этих агентов для повышения противоопухолевой эффективности и снижения побочных эффектов лечения. Синергетическое взаимодействие AgNPs с различными химиопрепаратами позволяет достигать сопоставимого терапевтического эффекта при более низких дозах противораковых средств, что одновременно уменьшает токсическое воздействие на нормальные клетки и здоровые ткани [62].

AgNPs постепенно занимают ключевые позиции в наномедицине, становясь материалом нового поколения. Их потенциал как важного наноматериала для биомедицинских и промышленных применений широко признан и активно исследуется.

Ограничения применения наночастиц серебра

AgNPs рассматриваются как многообещающие платформы для онкологической диагностики и терапии благодаря широкому спектру потенциальных фармакологических эффектов – от прямой цитотоксичности до возможностей для таргетированной доставки лекарств. Тем не менее, их клиническая реализация остается ограниченной, в первую очередь из-за недостаточной изученности фармакокинетики, биотрансформации и долгосрочных профилей безопасности. Понимание поведения AgNPs в организме, включая пути распределения, накопления и выведения, является ключевым шагом на пути к созданию безопасных наномедицинских систем [15].

Токсичность AgNPs представляет собой ключевое ограничение, которое необходимо тщательно оценивать для разработки безопасных и эффективных терапевтических платформ на их основе. Существенным фармакологическим фактором, определяющим системную токсичность AgNPs, является их биораспределение и накопление в тканях после введения. Исследования показывают, что распределение наночастиц в организме сильно зависит от их размера, формы и поверхностного заряда, что открывает возможность точной оптимизации органоспецифического нацеливания путем изменения этих характеристик [68].

Биораспределение и накопление AgNPs существенно зависят от путей поступления НЧ в организм. Например, при дермальном воздействии AgNPs преимущественно удерживаются в слоях эпидермиса и редко достигают дермы, за исключением случаев нарушения целостности кожного барьера. При ингаляционном пути основное депонирование наблюдается в легких, откуда в отдельных случаях возможна последующая транслокация в печень и головной мозг. Пероральное поступление характеризуется низкой системной биодоступностью, при этом наночастицы в основном обнаруживаются в печени и желудочно-кишечном тракте. Наиболее широкое системное распределение отмечается после внутрибрюшинного и внутривенного введения, когда печень, селезенка и почки становятся ключевыми органами накопления вследствие активного захвата наночастиц клетками мононуклеарной фагоцитарной системы. Таким образом, путь введения AgNPs является ключевым фактором, определяющим их фармакокинетику и потенциальную токсичность, при этом печень, легкие, селезенка и почки выступают основными органами их депонирования в организме. Наибольшее накопление наблюдается в печени, что связано с прохождением вводимых препаратов через воротную вену и их печеночной фильтрацией. Селезенка также демонстрирует высокую способность к захвату наночастиц серебра, что обусловлено фагоцитарной активностью клеток РЭС и последующей концентрацией НЧ в органах этой системы. В печени основными поглотителями AgNPs являются резидентные макрофаги – клетки Купфера [68, 69].

Несмотря на выраженный противоопухолевый потенциал AgNPs, их применение в биомедицине ограничено риском развития токсических эффектов, прежде всего за счет индукции окислительного стресса и повреждения здоровых тканей. В этом контексте особый интерес представляют биогенные AgNPs, которые характеризуются более низкой токсичностью по сравнению с химически и физически синтезированными формами серебра и, как правило, вызывают лишь умеренные токсические эффекты при сохранении широкого спектра биомедицинских применений. При этом установлено, что биогенные AgNPs сохраняют способность селективно воздействовать на опухолевые клетки, индуцируя внутриклеточный оксидативный стресс за счет

повышения уровня АФК, активации экспрессии опухолевого супрессора p53 и инициирования каспазозависимого апоптоза. Таким образом, биогенные AgNPs могут рассматриваться как более безопасная и перспективная альтернатива традиционным формам серебряных наноматериалов, способная частично нивелировать токсикологические ограничения, сдерживающие их клиническое применение [70, 71].

Заключение

Наночастицы серебра представляют собой одно из наиболее перспективных направлений наноонкологии благодаря широкому спектру биологических эффектов и возможности точной модификации их физико-химических характеристик. Обобщенные в обзоре данные свидетельствуют о том, что AgNPs оказывают выраженное противоопухолевое действие, реализуемое через многофакторные механизмы, включая индукцию окислительного стресса, повреждение ДНК, запуск каспаз-опосредованного апоптоза, остановку клеточного цикла, нарушение митохондриальной функции и подавление неоангиогенеза за счет ингибирования VEGF-зависимых сигнальных путей. Особое внимание привлекают биосинтезированные AgNPs, обладающие повышенной биосовместимостью и потенциалом к усилению противоопухолевых эффектов за счет природных фитоконпонентов.

Эффективность противоопухолевой терапии часто ограничивается развитием МЛУ, обусловленной комплексом взаимосвязанных механизмов. Генетическая нестабильность опухолевых клеток также играет ключевую роль в формировании лекарственной устойчивости, снижая процессы дифференцировки и созревания клеток, а нарушение механизмов контактного ингибирования способствует трансформации доброкачественных новообразований в более агрессивные злокачественные формы. Комбинированное использование AgNPs с химиотерапевтическими препаратами открывает новые возможности для преодоления лекарственной резистентности, повышения внутриклеточного накопления терапевтических средств и снижения системной токсичности. AgNPs также демонстрируют значительный потенциал в мульти-модальных стратегиях, включая фотодинамическую, фототермическую терапию и иммуномодулирующие подходы. В то же время важными остаются вопросы безопасности и предсказуемости биологических эффектов AgNPs. Их фармакокинетика, биodeградация, накопление в органах, влияние размера, формы, заряда и поверхности на токсичность требуют дальнейшего всестороннего изучения. Для успешного внедрения в клиническую практику необходимы стандартизированные методы оценки токсичности, разработка безопасных дозировочных режимов и создание более контролируемых платформ доставки. Понимание этих механизмов является ключевым условием

для разработки новых терапевтических стратегий, направленных на преодоление резистентности и повышение эффективности лечения злокачественных новообразований.

Несмотря на высокий потенциал, применение AgNPs в качестве носителей для доставки противоопухолевых препаратов исследовано относительно ограниченно. В связи с этим необходимы дополнительные систематические исследования, направленные на снижение токсичности и улучшение биосовместимости AgNPs, чтобы расширить возможности их применения в терапевтических наноплатформах.

На основании изложенного AgNPs представляют собой перспективный инструмент для современной противоопухолевой терапии. Их дальнейшее исследование и оптимизация способны обеспечить разработку нового поколения высокоселективных, эффективных и безопасных терапевтических платформ, открывая новые возможности для прецизионной наномедицины.

ЛИТЕРАТУРА

1. International Agency for Research on Cancer. (2020). Global cancer statistics 2020. IARC. <https://www.iarc.who.int/news-events/latest-global-cancer-data-cancer-burden-rises-to-19-3-million-new-cases-and-10-0-million-cancer-deaths-in-2020/>
2. World Health Organization. (2024a). Global cancer burden growing amidst mounting need for services. WHO. <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services>
3. International Agency for Research on Cancer. (2022). Global cancer burden in 2022. IARC. <https://www.iarc.who.int/news-events/global-cancer-burden-growing-amidst-mounting-need-for-services/>
4. World Health Organization. (2024b). Report on global cancer burden by world region and human development level. WHO. <https://www.iarc.who.int/news-events/new-report-on-global-cancer-burden-in-2022-by-world-region-and-human-development-level/>
5. Khaled A., Othman M., Obeidat S., Aleid G., Aboelnaga S., Fehaid A., Hathout H., Bakkar A., Moneim A., El-Garawani, I., et al. Green-Synthesized Silver and Selenium Nanoparticles Using Berberine: A Comparative Assessment of In Vitro Anticancer Potential on Human Hepatocellular Carcinoma Cell Line (HepG2) // "Cells", № 13, 2024. P. 287: <https://doi.org/10.3390/cells13030287>
6. Jin C., Wang K., Oppong-Gyebi A., Hu J. Application of Nanotechnology in Cancer Diagnosis and Therapy – A Mini-Review // "Int J Med Sci.", № 17 (18), 2020. PP. 2964–2973. DOI: 10.7150/ijms.49801
7. Wang B., Hu S., Teng Y. et al. Current advance of nanotechnology in diagnosis and treatment for malignant tumors // "Sig Transduct Target Ther.", № 9, 200, 2024: <https://doi.org/10.1038/s41392-024-01889-y>
8. Sell M., Lopes A., Escudeiro M., Esteves B., Monteiro A., Trindade T., Cruz-Lopes L. Application of Nanoparticles in Cancer Treatment: A Concise Review // "Nanomaterials", № 13, 2023. P. 2887: <https://doi.org/10.3390/nano13212887>

9. *Catalano A., Iacopetta D., Ceramella J., Scumaci D., Giuzio F., Saturnino C., Aquaro S., Rosano C., Sinicropi M.* Multidrug Resistance (MDR): A Widespread Phenomenon in Pharmacological Therapies // "Molecules", № 27, 2022. P. 616: <https://doi.org/10.3390/molecules27030616>
10. *Sabir S., Thani A., Abbas Q.* Nanotechnology in cancer treatment: revolutionizing strategies against drug resistance // "Front Bioeng Biotechnol.", 2025 Apr 30;13:1548588. DOI: 10.3389/fbioe.2025.1548588.
11. *Khalaf K., Hana D., Chou J-T, Singh C., Mackiewicz A., Kaczmarek M.* Aspects of the Tumor Microenvironment Involved in Immune Resistance and Drug Resistance // "Front Immunol", 2021 May 27;12:656364. DOI: 10.3389/fimmu.2021.656364
12. *Fallatah M., Alradwan I., Alfayez N., Aodah A., Alkhrayef M., Majrashi M., Jamous Y.* Nanoparticles for Cancer Immunotherapy: Innovations and Challenges // "Pharmaceuticals", № 18, 2025. P. 1086: <https://doi.org/10.3390/ph18081086>
13. *Haider T., Pandey V., Banjare N., Gupta P. N., Soni V.* (2020). Drug resistance in cancer: mechanisms and tackling strategies // "Pharmacol. Rep.", № 72, 2020. PP. 1125–1151. [10.1007/s43440-020-00138-7](https://doi.org/10.1007/s43440-020-00138-7)
14. *Chatterjee P., Kumar S.* Current Developments in Nanotechnology for Cancer Treatment // "Mater. Today Proc.", № 48, 2022. PP. 1754–1758. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.048>
15. *Takáč P., Michalková R., Čížmaríková M., Bedlovičová Z., Balážová L., Takáčová G.* The Role of Silver Nanoparticles in the Diagnosis and Treatment of Cancer: Are There Any Perspectives for the Future? // "Life (Basel)", № 13 (2), 2023. P. 466. DOI: 10.3390/life13020466
16. *Nirmala M-J, Kizhuveetil U., Johnson A., Balaji G., Nagarajan R., Muthuvijayan V.* Cancer nanomedicine: a review of nano-therapeutics and challenges ahead // "RSC Adv.", № 13(13), 2023. PP. 8606–8629. DOI: 10.1039/d2ra07863e
17. *Chaturvedi V., Singh A., Singh V., Singh M.* Cancer Nanotechnology: A New Revolution for Cancer Diagnosis and Therapy. Current drug metabolism. Netherland: "Hilversum", № 20, 2019. PP. 416–29. DOI: 10.2174/1389200219666180918111528
18. *Pucelik B., Sulek A., Borkowski M., Barzowska A., Kobielski M., Dąbrowski J.* Synthesis and Characterization of Size- and Charge-Tunable Silver Nanoparticles for Selective Anticancer and Antibacterial Treatment // "ACS Appl Mater Interfaces", № 14 (13), 2022. PP. 14981–14996. DOI: 10.1021/acsami.2c01100. Epub 2022 Mar 28.
19. *El-Borady O., Othman M., Atallah H., Moneim A.* Hypoglycemic potential of selenium nanoparticles capped with polyvinyl-pyrrolidone in streptozotocin-induced experimental diabetes in rats // "Heliyon", № 6, 2020. e04045
20. *Álvarez-Chimal R., Arenas-Alatorre J-A.* Green synthesis of nanoparticles. A biological approach. In *Advances in Green Chemistry*; Kinjal, J.S., Ed. // "IntechOpen", Chapter 5. Rijeka, Croatia, 2023.
21. *Kazaryan S., Farsiyan L., Tumoyan J., Kirakosyan G., Ayvazyan N., Gasparyan H., Buloyan S., Arshakyan L., Kirakosyan A., Hovhannisyan A.* Oxidative stress and histopathological changes in several organs of mice injected with biogenic silver nanoparticles // "Artif Cells Nanomed Biotechnol", № 50 (1), 2022. PP. 331–342. DOI: 10.1080/21691401.2022.2149931

22. Hosny S., Gaber G., Ragab M. et al. A Comprehensive Review of Silver Nanoparticles (AgNPs): Synthesis Strategies, Toxicity Concerns, Biomedical Applications, AI-Driven Advancements, Challenges, and Future Perspectives // “Arab J Sci Eng”, 2025. <https://doi.org/10.1007/s13369-025-10612-0>
23. Ye F., Zhao Y., El-Sayed R., Muhammed M., Hassan M. Advances in nanotechnology for cancer biomarkers. № 18, 2018. PP. 103–23: <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2017.12.008>
24. Bharali D., Mousa Sh. Emerging nanomedicines for early cancer detection and improved treatment: current perspective and future promise // “Pharmacology & therapeutics”, № 128, 2010. PP. 324–35. DOI: 10.1016/j.pharmthera.2010.07.007
25. Villasaliu D., Thanou M., Stolnik S. and Fowler R. Recent advances in oral delivery of biologics: nanomedicine and physical modes of delivery // “Expet Opin. Drug Deliv.”, № 15(8), 2018. PP. 759–770.
26. Kim M., Haney M., Zhao Y., Yuan D., Deygen I. and Klyachko N. et al., Engineering macrophage-derived exosomes for targeted paclitaxel delivery to pulmonary metastases: in vitro and in vivo evaluations // “Nanomedicine”, № 14 (1), 2018. PP. 195–204.
27. Raju G.; Benton L.; Pavitra E.; Su Yu J. Multifunctional Nanoparticles: Recent Progress in Cancer Therapeutics // “Chem. Commun.”, № 51, 2015. PP. 13248–13259.
28. Luo J.-Q., Liu R., Chen F.-M., Zhang J.-Y., Zheng, S.-J., Shao D., Du J.-Z. Nanoparticle-Mediated CD47-SIRP α Blockade and Calreticulin Exposure for Improved Cancer Chemo-Immunotherapy // “ACS Nano”, № 17, 2023. PP. 8966–8979.
29. Li Z., Zhu Y., Zeng H., Wang C., Xu C., Wang Q., Wang H., Li S., Chen J., Xiao C. Mechano-Boosting Nanomedicine Antitumour Efficacy by Blocking the Reticuloendothelial System with Stiff Nanogels // “Nat. Commun.”, № 14, 2023, P. 1437.
30. Tumoyan J., Kazaryan S., Hovhannisyan A. (2024). The Impact of Biogenic Silver Nanoparticles on the Enzymatic Antioxidant System of Wistar Rats’ Kidney. In: Sontea V., Tiginyanu I., Railean S. (eds) 6th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering. ICNBME 2023. IFMBE Proceedings, vol 91. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42775-6_58
31. Gomathi A., Rajarathinam S.X., Sadiq A. M., Rajeshkumar S. Anticancer activity of silver nanoparticles synthesized using aqueous fruit shell extract of Tamarindus indica on MCF-7 human breast cancer cell line // “J. Drug. Deliv. Sci. Technol”, № 55, 2020. 101376. DOI:10.1088/2053-1591/ac1de3
32. Barabadi H., Vahidi H., Rashedi M., Mahjoub M., Nanda A., Saravanan M. Recent advances in biological mediated cancer research using silver nanoparticles as a promising strategy for hepatic cancer therapeutics: a systematic review // “Nanomedicine Journal”, № 7, 2020. PP. 251–262. DOI:10.22038/nmj.2020.07.00001
33. Gomathi A., Rajarathinam S., Sadiq A., & Rajeshkumar S. Anticancer activity of silver nanoparticles synthesized using aqueous fruit shell extract of Tamarindus indica on MCF-7 human breast cancer cell line // “Journal of Drug Delivery Science and Technology”, 2020.
34. Tortella G., Rubilar O., Durán N., Diez, M., Martínez M., Parada J., Seabra A. Silver Nanoparticles: Toxicity in Model Organisms as an Overview of Its Hazard for Human Health and the Environment // “J. Hazard. Mater”, 2020. P. 390, 121974.
35. Carneiro B., El-Deiry W. Targeting Apoptosis in Cancer Therapy // “Nat. Rev. Clin. Oncol.”, № 17, 2020. PP. 395–417.

36. Suseela V., Nirmaladevi R., Pallikondaperumal M., Priya R., Shaik M., Shaik A., Khan M., Shaik B. Eco-Friendly Preparation of Silver Nanoparticles and Their Antiproliferative and Apoptosis-Inducing Ability against Lung Cancer // "Life", № 12, 2022. P. 2123.
37. Hembram K., Chatterjee S., Sethy C., Nayak D., Pradhan R., Molla S., Bindhani B., Kundu H. Comparative and Mechanistic Study on the Anticancer Activity of Quinacrine-Based Silver and Gold Hybrid Nanoparticles in Head and Neck Cancer // "Mol. Pharm.", № 16, 2019. PP. 3011–3023. DOI: 10.1021/acs.molpharmaceut.9b00242.
38. Papaliagkas V., Anogianaki A., Anogianakis G., Ilonidis G. The Proteins and the Mechanisms of Apoptosis: A Mini-Review of the Fundamentals // "Hippokratia", № 11, 2007. PP. 108–113.
39. Wang F., Chen Z., Wang Y., Ma C., Bi L., Song M., Jiang G. Silver Nanoparticles Induce Apoptosis in HepG2 Cells through Particle-Specific Effects on Mitochondria // "Environ Sci Technol.", № 56 (9), 2022. PP. 5706–5713. DOI: 10.1021/acs.est.1c08246
40. Khan A., Allemailem K., Almatroudi A., Almatroodi S., Mahzari A., Alsahli M., Rahmani A. Endoplasmic Reticulum Stress Provocation by Different Nanoparticles: An Innovative Approach to Manage the Cancer and Other Common Diseases // "Molecules", № 25, 2020. 5336.
41. Dos Santos C., Seckler M., Ingle A., et al. Silver nanoparticles: therapeutical uses, toxicity, and safety issues // "J Pharm Sci.", № 103 (7), 2014. PP. 1931–1944. doi:10.1002/jps.24001
42. Eker F., Duman H., Akdaşçi E., Witkowska A., Bechelany M., Karav S. Silver Nanoparticles in Therapeutics and Beyond: A Review of Mechanism Insights and Applications // "Nanomaterials", № 146, 2024. P. 1618. <https://doi.org/10.3390/nano14201618>
43. Austin L., Kang B., Yen C., El-Sayed M. Nuclear targeted silver nanospheres perturb the cancer cell cycle differently than those of nanogold // "Bioconjug Chem.", № 22 (11), 2011. PP. 2324–31. DOI: 10.1021/bc200386m
44. Takáč P., Michalková R., Čížmáriková M., Bedlovičová Z., Balážová L., Takáčová G. The Role of Silver Nanoparticles in the Diagnosis and Treatment of Cancer: Are There Any Perspectives for the Future? "Life", № 13, 2023, 466. <https://doi.org/10.3390/life13020466>
45. McShan D, Ray PC, Yu H. Molecular toxicity mechanism of nanosilver // "J Food Drug Anal.", № 22 (1), 2014. PP. 116–127. DOI:10.1016/j.jfda.2014.01.010
46. An overview of antimicrobial and anticancer potential of silver nanoparticles Author links open overlay panel Mohd Abass S. a., Sunitha S. a., Mohmmad Ashaq S. b., Khadheer Pasha S.K. c., Choi D. d. № 34, 2021. P. 101791 DOI:10.1016/j.jksus.2021.101791
47. Besson A., Dowdy S.F., Roberts J. CDK inhibitors: cell cycle regulators and beyond // "Developmental Cell", № 14 (2), 2008. PP. 159–69. DOI: 10.1016/j.devcel.2008.01.013
48. Canaparo R., Foglietta F., Limongi T., Serpe L. Biomedical Applications of Reactive Oxygen Species Generation by Metal Nanoparticles // "Materials", № 14, 2021, 53. <https://doi.org/10.3390/ma14010053>
49. García-Sánchez A., Miranda-Díaz A., Cardona-Muñoz E. The role of oxidative stress in physiopathology and pharmacological treatment with pro-and antioxidant properties in chronic diseases // "Oxid. Med. Cell. Longev", № (1), 2020.
50. Napione L., Alvaro M., Bussolino F. Vegf-mediated signal transduction in tumor angiogenesis // "Physiol Pathol Angiogenes Signal Mech Target Ther.", № 5, 2017. PP. 227–49.
51. Al-Abd A., Alamoudi A., Abdel-Naim A., Neamatallah T., Ashour O. Anti-angiogenic agents for the treatment of solid tumors: potential pathways, therapy and current strategies—a review // "J Adv Res.", № 8 (6), 2017. PP. 591–605.

52. *Gurunathan S., Kim J.* Silver nanoparticles enhance anti-angiogenic properties in human endothelial cells // “Journal of Nanobiotechnology”, № 11, 2013. P. 7.
53. *Zheng Y. et al.* Silver nanoparticles inhibit VEGF-induced angiogenesis in human endothelial cells and mouse models // “Nanomedicine”, № 7 (1), 2011. PP. 95–105.
54. *Kumar B., et al.* Silver nanoparticles suppress hypoxia-induced HIF-1 α and VEGF expression in cancer cells // “Toxicology Letters”, № 227 (2), 2014. PP. 179–187.
55. *Habibullah G., et al.* Silver nanoparticles induce cytoskeletal disruption and inhibit focal adhesion kinase in endothelial cells // “Toxicology Research”, № 4, 2015. PP. 655–666.
56. *Alsaab H., Al-Hibs A., Alzhrani R., Alrabighi K., Alqathama A., Alwithenani A., Almalki A., Althobaiti Y.* Nanomaterials for Antiangiogenic Therapies for Cancer: A Promising Tool for Personalized Medicine // “Int. J. Mol. Sci.”, № 22, 2021. 1631. <https://doi.org/10.3390/ijms22041631>
57. *Zeng L., Wei Y., Qiu Y., Bi R., Peng H., Hu B. & Li Y.* Nanomaterial-Based Anti-Angiogenic Gene Therapy for Retinal Neovascular Diseases: Mechanistic Insights and Preclinical Advances // “International Journal of Nanomedicine”, № 20, 2025. PP. 11361–11388
58. *Kalyane D., Raval N., Maheshwari R., Tambe V., Kalia K., Tekade R.* Employment of enhanced permeability and retention effect (EPR): Nanoparticle-based precision tools for targeting of therapeutic and diagnostic agent in cancer // “Mater Sci Eng. C. Mater Biol”, № 98, 2019. PP. 1252–1276. DOI: 10.1016/j.msec.2019.01.066
59. *Velpurisiva P., Gad A., Piel B., Jadia R., Rai P.* Nanoparticle Design Strategies for Effective Cancer Immunotherapy // “J Biomed” (Syd). № 2 (2), 2017. PP. 64–77. DOI: 10.7150/jbm.18877
60. *Yang YL, Yang F, Huang ZQ, Li YY, Shi HY, Sun Q, Ma Y, Wang Y, Zhang Y, Yang S, Zhao GR, Xu FH.* T cells, NK cells, and tumor-associated macrophages in cancer immunotherapy and the current state of the art of drug delivery systems // “Front Immunol.”, № 14, 2023. 1199173. DOI: 10.3389/fimmu.2023.1199173
61. *Sargsian A., Koutsoumpou X., Girmatsion H. et al.* Silver nanoparticle induced immunogenic cell death can improve immunotherapy // “J Nanobiotechnol”, № 22, 691, 2024. <https://doi.org/10.1186/s12951-024-02951-1>
62. *Kovács D., Igaz N., Gopisetty M., Kiricsi M.* Cancer Therapy by Silver Nanoparticles: Fiction or Reality? // “Int. J. Mol. Sci.”, № 23, 2022. P. 839: <https://doi.org/10.3390/ijms23020839>
63. *Cameron S., Hosseinian F., Willmore W.* A Current Overview of the Biological and Cellular Effects of Nanosilver // “Int. J. Mol. Sci.”, № 19, 2018. P. 2030.
64. *Singh P., Pandit S., Balusamy S., Madhusudanan M., Singh H., Mohamed Amsath Haseef, Mijakovic I.* Advanced Nanomaterials for Cancer Therapy: Gold, Silver, and Iron Oxide Nanoparticles in Oncological Applications // “Adv. Healthcare Mater.”, № 14, 2025. P. 2403059: <https://doi.org/10.1002/adhm.202403059>
65. *Rajib Das. et al.* Silver Nanoparticles in Combination Cancer Therapy: Enhancing Efficacy and Overcoming Resistance // “Acta Scientific Pharmaceutical Sciences”. Vol. 9, № 11, 2025. PP. 15–24.
66. *Jiang Y., Wang C., Zu C., Rong X., Yu Q., Jiang J.* Synergistic Potential of Nanomedicine in Prostate Cancer Immunotherapy: Breakthroughs and Prospects // “Int J Nanomedicine”, № 19, 2024. PP. 9459–9486. DOI: 10.2147/IJN.S466396

67. Hosny S., Gaber G., Ragab M. et al. A Comprehensive Review of Silver Nanoparticles (AgNPs): Synthesis Strategies, Toxicity Concerns, Biomedical Applications, AI-Driven Advancements, Challenges, and Future Perspectives // “Arab J Sci”, Eng (2025). <https://doi.org/10.1007/s13369-025-10612-0>
68. Blanco E., Shen H., Ferrari M. Principles of nanoparticle design for overcoming biological barriers to drug delivery // “Nat. Biotechnol.”, № 33, 2015. PP. 941–951.
69. Wu M., Chen L., Li R., Dan M., Liu H., Wang X., Wu X., Liu Y., Xu L., Xie L. Bio-distribution and bio-availability of silver and gold in rat tissues with silver/gold nanorod administration // “RSC Adv.”, № 8, 2018. PP. 12260–12268.
70. Abass S., Sunitha S., Ashaq S., Khadheer P., Choi D. An Overview of Antimicrobial and Anticancer Potential of Silver Nanoparticles // “J. King Saud Univ.-Sci.”, № 34, 2022. P. 101791.
71. Hembram K., Kumar R., Kandha L., Parhi P., Kundu C., Bindhani B. Therapeutic Prospective of Plant-Induced Silver Nanoparticles: Application as Antimicrobial and Anticancer Agent // “Artif. Cells Nanomed. Biotechnol.”, № 46, 2018. PP. 38–51.

BIOCOMPATIBLE SILVER NANOPARTICLES AS PROMISING ANTICANCER AGENTS

J. Tumoyan

Russian-Armenian University

Institute of Biomedicine and Pharmacy

Department of Medical Biochemistry and Biotechnology

ORCID:0009-0000-1630-703X

ABSTRACT

Oncological diseases remain one of the leading global health challenges, with continuously increasing incidence and mortality rates, thereby driving the search for novel, effective, and safe therapeutic agents. Against the backdrop of the rapid development of nanotechnologies, particular interest has been directed toward nanoparticles with unique physicochemical properties that enable targeted effects on tumor cells and modulation of intracellular processes. Among these, silver nanoparticles (AgNPs) are considered promising anticancer agents due to their pronounced cytotoxic, pro-apoptotic, and antiproliferative properties.

In recent years, significant attention has been devoted to elucidating the molecular mechanisms underlying their biological activity, including the generation of reactive oxygen and nitrogen species (ROS and RNS), mitochondrial dysfunction, caspase activation, modulation of key signaling pathways, biopolymer denaturation, and inhibition of tumor neoangiogenesis, including suppression of HIF-1 α /VEGF-dependent pathways. Biogenic (“green”) synthesis of silver nanoparticles not only improves the biocompatibility of AgNPs but also enables the incorporation of biologically active phytochemicals, thereby enhancing their antiproliferative and pro-apoptotic potential. Moreover, AgNPs demonstrate pronounced synergistic effects with chemotherapeutic agents, contributing to the overcoming of multidrug resistance and improving treatment efficacy.

This review also addresses the limitations associated with potential toxicity, tissue accumulation, and the sensitivity of nanoparticle properties to size, shape, and coating type. Current strategies aimed at improving the safety and targeting of AgNPs are discussed, including biogenic synthesis

and surface functionalization. Despite significant progress, the clinical application of AgNPs remains limited due to an incomplete understanding of their pharmacokinetics, biotransformation, and toxicity.

Keywords: oncology, nanotechnology, silver nanoparticles, anticancer activity, molecular mechanisms.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Аванян А.Б. – аспирант первого года обучения по специальности «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ Российско-Армянского университета

Авагян Т.С. – магистрант первого курса по направлению подготовки «Прикладная математика и информатика (ОП «Системное программирование»)

Арамян А.Ж. – магистрант второго курса по направлению подготовки «Прикладная математика и информатика» (ОП «Искусственный интеллект и робототехника») Российско-Армянского университета

Асланян А.К. – к.ф.-м.н., доцент, преподаватель кафедры системного программирования Российско-Армянского университета

Киракосян Л.А. – аспирант третьего года обучения по специальности «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей» Российско-Армянского университета

Маладжян А.А. – аспирант первого года обучения по специальности «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей» Российско-Армянского университета

Мелконян В.Г. – аспирант третьего года обучения по специальности «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей» Российско-Армянского университета

Микаелян Г.В. – аспирант третьего года обучения по специальности «Математическая кибернетика и информационная безопасность» Ереванского государственного университета

Мовсисян О.М. – аспирант второго года обучения по специальности «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей» Российско-Армянского университета

Оганесян О.А. – аспирант третьего года обучения по специальности «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей» Российско-Армянского университета

Оганнесян Б.А. – к.ф.-м.н., преподаватель кафедры телекоммуникаций Российско-Армянского университета

Оганнесян С.Ж. – магистрант второго курса по направлению подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» Российско-Армянского университета

Пинаян М.В. – магистрант второго курса по направлению подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (ОП «Беспроводные коммуникации и сенсоры») Российско-Армянского университета

Погосян В.Т. – аспирант первого года обучения по специальности «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей» Российско-Армянского университета

Саакян В.Р. – аспирант третьего года обучения по специальности «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей» Российско-Армянского университета

Сардарян А.С. – аспирант второго года обучения по специальности «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» Российско-Армянского университета

Сиволенко Э.Р. – к.т.н., заведующий кафедрой телекоммуникаций Российско-Армянского университета

Смбатян М.М. – аспирант первого года обучения по специальности «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей» Российско-Армянского университета

Сурменелян К.С. – аспирант первого года обучения по специальности «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей» Российско-Армянского университета

Туманян О. – студент четвертого курса бакалавриата по специальности «Обработка данных в физике и искусственный интеллект» Ереванского государственного университета

Тумоян Дж.Г. – аспирант четвертого года обучения по специальности «Биохимия», преподаватель кафедры медицинской биохимии и биотехнологии Российско-Армянского университета

Хачатрян Г.А. – магистрант второго года обучения по направлению подготовки «Прикладная математика и информатика (ОП «Искусственный интеллект и робототехника») Российско-Армянского университета

Цирунян В.Д. – преподаватель кафедры дискретной математики и теоретической информатики Ереванского государственного университета

**Вестник Российско-Армянского университета.
(Серия: физико-математические и естественные науки), № 1, 2026г.**

**Vestnik of Russian-Armenian University
(Series: Physicalmathematical and Natural sciences), № 1, 2026**

Главный редактор РНИ – М.Э. Авакян Кор- редактор – А.С. Есаян, Н.Б. Бадалян *Editor-in-Chief of the RNI – M.E. Avakyan Proof- reader – A.S. Yesayan, N.B. Badalyan*
Компьютерная верстка – А.С. Бжикян *Computer layout – A.S. Bzikyan*

*Адрес Редакции научных изданий Российско-Армянского университета:
0051, г. Ереван, ул. Овсепя Эмина, 123
тел./факс: (+374 12) 77-57-75 (внутр. 392) e-mail: maria.avakian@rau.am*

*Address of the Editorial Board of Scientific Publications of the Russian-Armenian University:
0051, Yerevan, st. Hovsep Emin, 123
tel./fax: (+374 12) 77-57-75 (ext. 392)
e-mail: maria.avakian@rau.am*

Заказ № 3
Подписано к печати 13.03.2026г.
Формат 70x100¹/₁₆. Бумага офсетная № 1.
Объем усл.7.9 п.л. Тираж 110 экз.

Order No. 3
Signed for publication 13.03.2026
Format 70x100¹/₁₆. Offset paper No. 1.
Volume 7.9 conv. p.l. Circulation 110 copies