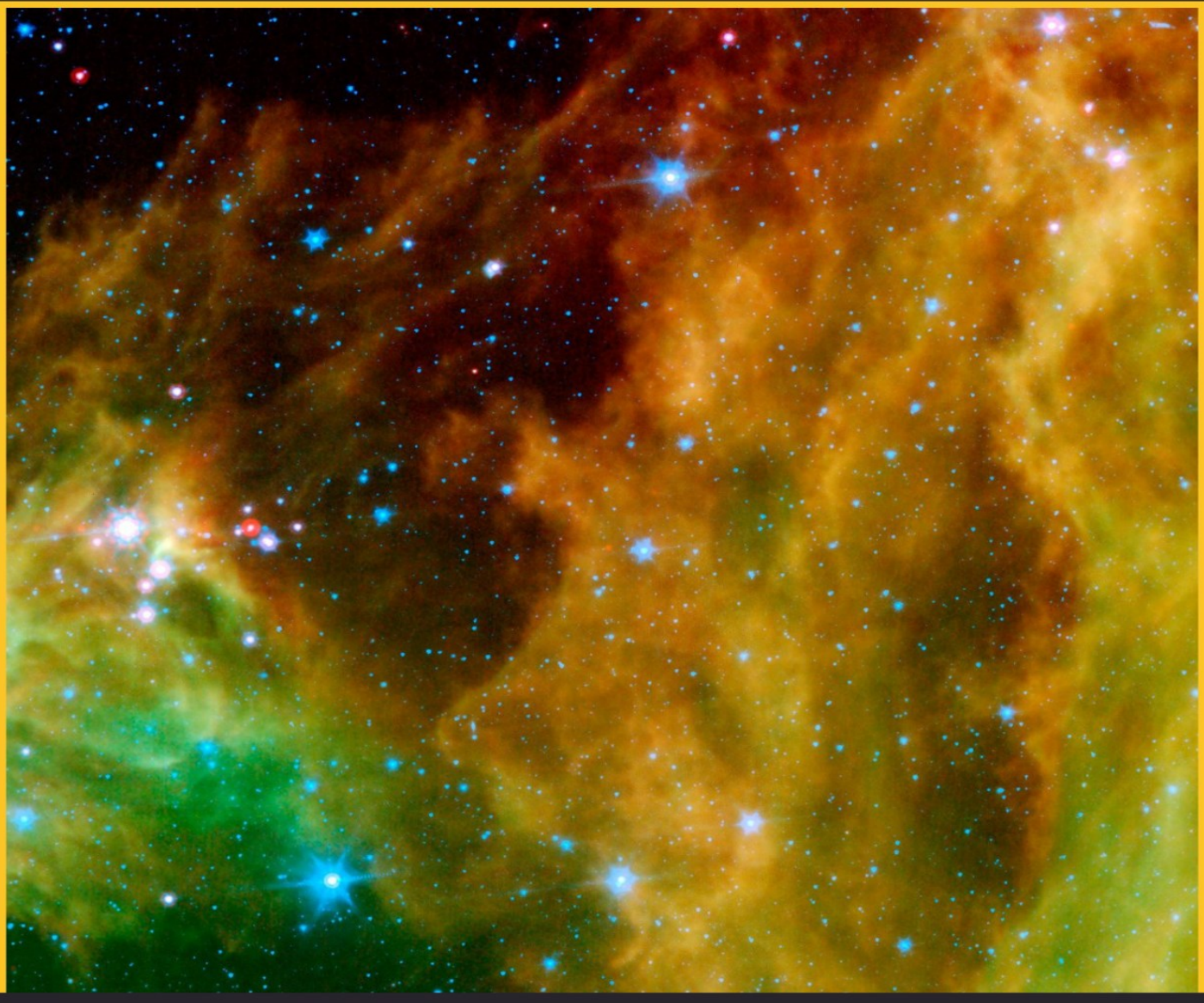
SEPTEMBER 2026 | ISSUE #9(2)

INTERNATIONAL JOURNAL OF PROFESSIONAL SCIENCE

INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL



SCIPRO.RU
ISSN 2542-1085

SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIES

UDC 001
LBC 72

International Journal Of Professional Science: international scientific journal, Nizhny Novgorod, Russia: Scientific public organization “Professional science”, №9(2) - 2026. 170 p.

ISSN 2542-1085

International journal of Professional Science is the research and practice edition which includes the scientific articles of students, graduate students, postdoctoral students, doctoral candidates, research scientists of Russia, the countries of FSU, Europe and beyond, reflecting the processes and the changes occurring in the structure of present knowledge.

It is destined for teachers, graduate students, students and people who are interested in contemporary science.

All articles included in the collection have been peer-reviewed and published in the form in which they were presented by the authors. The authors are responsible for the content of their articles.

The information about the published articles is provided into the system of the Russian science citation index – RSCI under contract № 2819-10/2015K from 14.10.2015

The electronic version is freely available on the website http://scipro.ru/ijps.html

UDC 001

LBC 72



Editorial team

Chief Editor – Krasnova Natalya, PhD, assistant professor of accounting and auditing the Nizhny Novgorod State University of Architecture and Construction. (mail@nkrasnova.ru)
Zhanar Zhanpeisova — Kazakhstan, PhD
Khalmatova Barno Turdyhodzhaeva — Uzbekistan, MD, Professor, Head of the Tashkent Medical Academy
Tursunov Dilmurat Abdullazhanovich — Kyrgyzstan, PhD, Osh State University
Ekaterina Petkova,Ph.D Medical University — Plovdiv
Stoyan Papanov PhD, Department of Pharmacognosy and pharmaceutical chemistry, Faculty of Pharmacy, Medical University — Plovdiv

Materials printed from the originals filed with the organizing committee responsible for the accuracy of the information are the authors of articles

Editors N.A. Krasnova, 2026

Article writers, 2026

Scientific public organization
“Professional science”, 2026

Table of contents

INTRODUCTION 6
ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION 7
Khalikov R.M., Ivanova O.V., Latypova Z.B., Pavlov S.Y., Glazachev A.O. Geodesic surveys carried out during the road and transport building of the M-12 highway section in Bashkortostan 7
Voinova D.A., Zaitsev N.S. Comparison of water supply and sewerage design approaches for large sports complexes in Saint Petersburg and Abu Dhabi 23
Voinova D.A., Zaitsev N.S. Design methods for water supply and sewerage systems in dense urban development and large metropolitan areas: the cases of Saint Petersburg and Dubai 36
CHEMISTRY AND MATERIALS SCIENCE 49
Guzenko O.A., Kuznetsov V.V. Development of packaging materials with the incorporation of silver nanoparticles 49
ENERGY AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGIES 58
Karpovich V. Conceptual model for assessing the environmental sustainability of artificial intelligence in the context of the green economy 58
ENGINEERING APPLICATIONS 71
Tumanova E.Y., Matsegora A.V. Improvement of patch preparation technology for welding technological openings in main gas pipelines 71
ENVIRONMENT AND ECOLOGY 78
Piksasova L.N. Man-made transformation of Crimean landscapes in mining areas and prospective use of quarry territories (using the example of a quarry in the village of Skalistoe Bakhchisarai district) 78
INDUSTRIAL RESEARCH AND PRODUCTION 84
Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Dolbin I.D. A risk-based approach to planning the internal audit of mine production processes 84
Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Dolbin I.D. Auditing the Reliability of Reserve Movement Data and Valuable Component Losses in Open-Pit Placer Mining: The Case of the Mineral Resource Complex of North-Eastern Russia 93
Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Guzenko A.D. Audit of calculations of loss and dilution standards as an instrument for controlling the mineral extraction tax base 102
Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Guzenko A.D. Organization of the industrial safety audit at a mining enterprise: from formal compliance control to process maturity assessment 111
Sarkisov A.M., Belov P.S., Belova Y.A., Nikiforov D.Y., Nikiforova O.V., Chorieva A.A. Problems and prospects for using artificial intelligence technologies to assess occupational risks at machine-building enterprises 123
Zmirskas F.S. Predictive analytics and technical audits as factors in reducing downtime at pulp and paper industry enterprises 131

PHYSICAL SCIENCES 138
Anikyev A.A., Sitnikov M.A. Optical layout of the imaging objective within a laboratory spectrometer 138
REVIEWS AND ANALYSIS 144
Rechkina M.S., Kasatkin D.M. Liability for the Generation of Malicious Code: Delineating Responsibility Between the AI Model Creator and the User Who Circumvented Its Restrictions 144
TECHNOLOGICAL DEVELOPMENTS 150
Chaikina D.V., Khafizov I.I. A method for fault localization and recovery action selection in the autonomous service cycle of the Falco robotic system 150
TRANSPORT AND MOBILITY 162
Andryushchenko S.A., Korolkov E.V., Nazarov P.S. Methods of aviation electrical communication between air traffic control authorities and UAV operators 162
CONCLUSION 169

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

INTRODUCTION

The latest issue of the *International Journal of Professional Science* (No. 9(2)) addresses current issues in the development of architecture, engineering, industry, energy, environmental science, and digital technologies. The research presented reflects modern trends in scientific and technological progress and focuses on enhancing the safety, efficiency, and sustainability of production and infrastructure systems.

The "Architecture and Construction" section examines geodetic support for road construction, as well as the design of water supply and sanitation systems for large-scale sports facilities and major metropolitan areas. Significant attention is paid to the development of new packaging materials incorporating silver nanoparticles and to assessing the environmental sustainability of artificial intelligence within the context of the transition to a "green" economy.

A dedicated section covers the improvement of engineering and production processes, including the preparation of repair patches for main gas pipelines, the rehabilitation of quarry sites, internal audits of mining enterprises, inventory control, industrial safety, and the reduction of production downtime. Research on the application of artificial intelligence for occupational risk assessment and issues regarding liability for the creation of malicious software also feature prominently.

The issue also includes studies in the fields of physics, spectrometry, robotic systems, and aviation telecommunications. This thematic diversity highlights the interdisciplinary nature of modern science, where engineering solutions, digital analytics, environmental requirements, and legal regulations are examined in an interconnected manner.

With best wishes and warm regards,
Editor-in-Chief
International Journal of Professional Science
Krasnova N.A.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION

UDC 625.7/.8: 528.48

Khalikov R.M., Ivanova O.V., Latypova Z.B., Pavlov S.Y., Glazachev A.O. Geodesic surveys carried out during the road and transport building of the M-12 highway section in Bashkortostan

Геодезические изыскания в процессе дорожно-транспортного строительства участка автомагистрали М-12 в Башкортостане

Khalikov Rauf Muzagitovich,
PhD in Chemistry, Associate Professor of the Department of "Highways, Bridges and Transport Structures", "Ufa State Petroleum Technological University", Russia, Ufa;
Ivanova Olga Vladimirovna,
PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of "Operation of Land Transport in Petroleum and Gas Industry and Building, "Ufa State Petroleum Technological University", Russia, Ufa;
Latypova Zakira Badretdinovna,
PhD in Geography, Associate Professor of the Department of "Tourism, Geo-Urban Studies and Economic Geography", "Ufa University of Science and Technology", Russia, Ufa;
Pavlov Stanislav Yuryevich
PhD in Law, Associate Professor of the Department of "Financial and Administrative Law", "Ufa University of Science and Technology", Russia, Ufa;
Glazachev Anton Olegovich,
PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of " Highways, Bridges and Transport Structures", "Ufa State Petroleum Technological University", Russia, Ufa

Abstract. *The priority area for the development of Russia's transport infrastructure is the construction of speed highways. This article focuses on the engineering and geodesic support for the road construction of a section of the federal highway M-12. The 140 km long "Dyurtuli – Achit" section of the four-lane M-12 motorway runs through the north-west of Bashkortostan. The design and construction of main highways are preceded by geodesic surveys, which include: reconnaissance studies; detailed engineering and technical development of the highway project and transport structures; and the preparation of working drawings. During the construction of the M-12 federal highway section in Bashkortostan, geodesic instruments and equipment were used: a theodolite, a level, tacheometer, a global navigation satellite system, a laser scanner, aerial photography equipment, and others. One of the main tasks of geodesic surveys in the course of road and transport construction is to create accurate topographic maps of the area, which are necessary for designing highways, determining the optimal route, and calculating the volume of work. Among the promising trends in the development of geodesic surveys in road and transport construction, it is worth noting highly intelligent robotic systems that can independently carry out three-dimensional surveying of the roadway terrain and analyze data using artificial intelligence. For the smooth operation*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

of the intelligent transport infrastructure of the M-12 "Vostok" highway with a permitted speed of up to 120 km/h, a complementary and accurate reproduction of the highway's geometry, road signs, markings, etc., is required. Engineering and geodesic surveys of the M-12 highway section in Bashkortostan lay a solid foundation for the safe and cost-effective operation of the road and transport infrastructure.

Keywords: *transport infrastructure, geodesic survey, tacheometer survey, highway.*

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

The building and reconstruction of speed and quality highways are priority areas for the development of the transport infrastructure of the Russian Federation. To address the pressing issues in road and transport building, engineering and geodesic surveys of highway route routes are required [1, 2]. Geodesic surveys in the area of highways under construction provide reliable data on the terrain, relief, and existing artificial structures.

The purpose of this article is to examine the engineering and geodesic support for the road building of the "Dyurtuli – Achit" section of the speed federal highway M-12 "Vostok".

The "Dyurtuli – Achit" section of the four-lane IB category M-12 highway, 140 km long, runs through the north-west of Bashkortostan (Dyurtyulinsky, Buraevsky and Tatyshlinsky districts). The new section of the Dyurtuli – Achit road part of the high-speed route from Moscow to Yekaterinburg, is a continuation of the M-12 "Moscow–Kazan" highway and begins at the interchange with the 1221st km of the M-7 "Volga" road (near the city of Dyurtuli). The expressway crosses swampy lowlands, uplands, and river valleys (including the Belaya River near the village of Vostretsovo in the Buraevsky District).

The relief of the Dyurtyulinsky and Buraevsky districts of Bashkortostan is gently undulating, dissected by the valleys of the lower reaches of the Belaya River and its tributaries (Bystryy Tanyp) within the Pribelskaya hummocky-rolling plain. The landscape of the Tatyshlinsky district is hummocky; there are low, level interfluves, as well as individual elevations (asymmetric ridges that are dissected by gullies and ravines). From the perspective of road and transport building, this segment of the highway is among the most challenging due to the diverse geotechnical conditions involved in building a high-quality road surface, dozens of road bridges, elevated overpasses and other transport structures (Figure 1).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

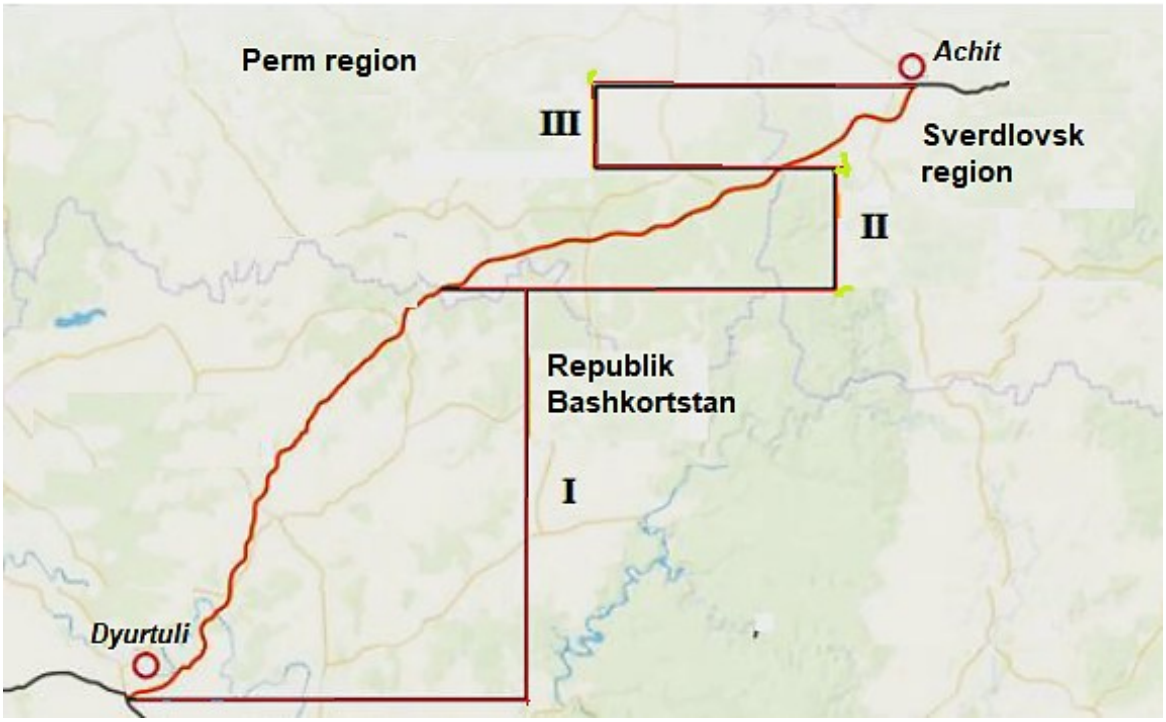


Figure 1. Layout diagram of the "Dyurtuli – Achit" section of the M-12 highway
(**I** – 140 km; **II** – 92 km; **III** – 43 km)

In some lower sections of the route, sinkholes and karst lakes are found, which is due to the characteristics of the underlying rocks (permian limestones, etc.). Therefore, during the design process, it was necessary to bypass swampy and karst areas, which increased the volume of earthworks. The route of the "Dyurtuli – Achit" section in Bashkortostan passes, among other things, through specially protected natural areas and oil and gas fields, bypassing settlements and archaeological sites, which also imposed additional restrictions. The necessary connection to the transport infrastructure of existing roads will be provided via two transport interchanges: the first is located at 68 km of the new highway, at the intersection with the regional road "Ufa–Birsk–Yanaul", and the second is at 127 km, at the intersection with the regional road "Buraevo–Starobaltachevo–Kueda".

The building of main highways is preceded by a set of geodesic surveys, which include: reconnaissance studies for the technical and economic justification of the project; detailed engineering surveys to develop the technical design of the highway and transport structures; and the preparation of working drawings. The smoothness and safety of traffic at specified speeds on highways are strictly regulated by maximum (guiding) slopes and minimum curve radii. In the context of actively developing transport infrastructure and geo-urbanization, design surveys in the road building industry are becoming particularly important [3].

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

In the process of designing and constructing the federal highway M-12 [4] section of the route in Bashkortostan, geodesic instruments and equipment were used to improve the efficiency and quality of engineering and geodetic surveys: a theodolite, a level, a total station, equipment for the global navigation satellite system, a laser scanner, aerial photography equipment, a cable tracer; unmanned aerial vehicles, satellite navigation methods, and others were also used. Aerial photography data, processed using digital software modules, make it possible to promptly adjust the road and transport building process. The result of the engineering and geodesic surveys is a topographic plan of the area, showing the relief and the existing situation (including real estate objects such as buildings, power lines, etc.).

At the same time, the main tools for engineering and geodesic support of the road construction process remain tacheometers (total stations) for measuring angles, distances, and coordinates of points. In tacheometric surveying at scales (1:500–1:5000), the planned position of highway points is determined using the polar coordinate method, while the elevation is determined by trigonometric leveling using an inclined beam. Field geodesic surveys in the process of tachometric surveying (Figure 2) begin with reconnaissance of the terrain, i.e., with an inspection of the landscape and the creation of a planimetric and elevational framework.



Figure 2. Tacheometric survey of the highway building site

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Currently, traditional methods of geodesic surveys in the process of road and transport building (tacheometric surveying to obtain a topographic map of the area, leveling) are being supplemented by satellite technologies for creating networks and referencing; laser scanning and the use of unmanned aerial vehicles for detailed 3D models, etc. An electronic tacheometer is a highly accurate modern geodesic instrument that consists of an angle-measuring part, a rangefinder, and a built-in computer. Digital technology for designing highways makes it possible to construct a three-dimensional model of the terrain, which is created on a computer and obtained through continuous total station surveying or laser scanning. Tracing is a set of engineering and technical works aimed at obtaining the optimal route option in relation to the terrain and relief.

The road and transport building of the “Dyurtuli–Achit” section of the M-12 “Vostok” highway in Bashkortostan began in 2022; in July 2025, the high-speed highway was put into operation. The speed highway, with a permitted speed of up to 120 km/h, includes: 50 overpasses, 6 transport interchanges, 25 road bridges, 24 eco-overpasses and bi-transits for animals, which will help improve traffic safety. The key components of the automotive transport infrastructure of federal highways are roads with two or more lanes in each direction, featuring barrier separators between traffic flows; bridges, transport interchanges, noise-reducing screens, mobile communication towers, multifunctional roadside areas with gas stations, etc. Category I roads (with an estimated traffic volume exceeding 14000 vehicles per day) best meet the conditions for optimized automotive traffic.

The building and commissioning of the high-speed M-12 motorway along one of the busiest routes in the country – from the central part of Russia to the Urals – will lead to a shift in traffic away from the overloaded federal highways M-7 “Volga” and M-5 “Ural”. Speed highways have asphalt concrete pavement, wide lanes (3.75 m), increased turning radii and limited maximum gradients (3–4 %), as well as wider shoulders. Such road structures ensure high throughput and optimized safety for round-the-clock traffic; in winter, snow removal is carried out and the road surface is treated to prevent icing. The ensemble of interconnected infrastructure transport facilities includes speed highways; technical services of the road infrastructure; various buildings for operation; road service facilities; and other auxiliary structures.

The project for the “Dyurtuli – Achit” highway section in Bashkortostan provides the construction of more than 105 artificial transport structures, including five transport interchanges, as well as the relocation of utility lines and the stabilization of soil foundations [5]. Despite the variety of engineering transport structures on the Dyurtuli–Achit section of the M-12 highway, the following tasks are addressed during their design and building: obtaining

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

geodesic data when developing construction project designs (engineering and geodetic surveys); determining the main axes and boundaries of structures on the ground in accordance with the construction project (layout works); ensuring that the geometric shapes and dimensions of the elements of the facilities comply with the project during building, etc. Geodesic control includes checking elevation marks, monitoring the location of transport structures, and measuring the profiles of the highway [6].

It should be noted that engineering and geodesic surveys in road and transport construction provide accurate data on the relief of the landscape for the design, building, and reconstruction of roads. Geodesic support makes it possible to: develop topographic and geodetic materials to substantiate design solutions; select the optimal route for the highway, taking into account natural landscape conditions; ensure the required accuracy from the layout in the field to monitoring during the building of a speed highway; reduce the risks of operational deformations and, subsequently, guarantee the safety of traffic.

Geodesic surveys related to laying out a highway on the ground involve the following operations: assigning lines of a given direction and slope, measuring or marking turning angles, marking and securing the route, marking curves at turning angles; dividing the entire route into 100-meter segments (pickets); leveling to determine the elevations of points located along the route in hard-to-reach areas and to select locations for the future building of road transport facilities.

The regulatory framework for geodesic surveys is GOST 32869-2014 “Automobile roads of general use. Requirements for carrying out of topographic-geodetic researches.” According to GOST 32869, the following stages of geodesic surveys are distinguished:

- preparatory work (collection and analysis of old topographic maps based on archival materials, desk-based tracing of route options, engineering of a geodesic work program, and selection of geodetic equipment);
- field work (creation of a planimetric and elevational geodesic framework (reconnaissance, securing benchmarks and network points); topographic surveying of the area along the route (scale 1:5000–1:500); field tracing: marking and securing route points (turning angles, picketing, etc.); leveling of the route and profiles; detailed tachymetric surveying: terrain; inspection of existing engineering structures (bridges, pipelines, etc.);
- desk-based (processing of field data: compiling engineering and topographic plans, profiles, and a digital model of the landscape terrain; preparing a technical report for the client).

The digital terrain model can be represented as a combination of individual digital models (layers): landscape relief; situational features; soil and ground conditions, hydrogeological,

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

engineering geological, and hydrometeorological conditions; technical and economic indicators; and other characteristics of the terrain.

Among the many tasks solved using digital models, it should be noted: optimal spatial tracing of highways; obtaining longitudinal and transverse engineering geological sections along the axis of the route; obtaining initial engineering and hydrological information for the design of culverts; solving the problem of land mass distribution and vertical layout; spatial modeling of the roadway and ensuring the requirements environmental safety of the surrounding landscape [7]. The appropriate layout of the elements of the cross-section of the roadbed involves marking on the ground, in plan and in height, all the characteristic points of the cross-section of the roadbed: the carriageway, the shoulders, the slopes, the culverts, the base of the embankments, etc.

In addition to the usual tacheometers accepted for use to replace theodolites, others currently, in the process of geodesic surveys in road transport building, innovative electronic robotic measurement systems based on GPS (GLONAS antennas and 3D laser scanners [8, 9]) have been developed and are being used. A modern geodesic GPS receiver consists of three main elements: the receiver itself – the main device that receives information from satellites, processes it, and records it in memory (or to an external device); the antenna – the receiving element; the controller – a device that allows you to control the operation of the receiver. It should be noted that after western countries, imposed sanctions restrictions on the Russian Federation, high-precision imported electronic total stations became difficult to obtain [10].

In article [11], the authors developed methods for using electronic tacheometers to determine the slope steepness of the roadbed and the visibility distances of the road and oncoming vehicles on vertical curves; as well as to determine the actual geometric parameters of highways when assessing the quality of road and transport building. It should be noted that even when using the latest equipment, the quality of geodesic survey materials in terms of accuracy and informativeness is limited by other factors of a technological and organizational nature inherent in highway construction [12]. Therefore, to establish optimal requirements for the accuracy of geodetic work at all stages of a highway's life cycle, the justification for the accuracy requirements for geodesic work must be linked to changes in the standards for the accuracy of geometric parameters, using a systematic approach.

It should be noted that all geodesic and geoinformation works performed using unmanned aerial vehicles, topographic aerial photography, and laser scanning require accuracy (up to 2 cm in height, 5 cm in plan) and equipment (certified geodetic modules) in accordance with regulatory documents: GOST R 56122-2014, GOST R 57258-2016, GOST R 59328-2021, GOST R 59517-2021, GOST R 71886-2024, as well as the code of rules of CR

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

317.1325800.2017 "Engineering and geodetic surveys for building. General rules for carrying out work".

Global navigation satellite systems play a key role in modern geodesic monitoring of road and transport building of highways. The main advantages of global navigation satellite systems are: they allow measurements to be taken in remote and hard-to-reach areas; high accuracy in determining coordinates, with deviations of up to 1–2 millimeters; independence from weather conditions; and the speed of measurements. It should also be noted that several rovers (mobile receivers) can operate from a single base station of a navigation satellite system, which makes it possible to carry out layout work simultaneously and manage the optimal operation of road building equipment.

One of the main tasks of geodesic surveys in the course of road and transport building is to create accurate topographic maps of the area, which are necessary for designing routes, finding the optimal route, and calculating the volume of work. Multicopters – unmanned aerial vehicles built according to a helicopter design, with 4–8 main rotors [13] – are widely used in geodesy for creating topographic maps; they collect information about the landscape and structures within a given area. Multicopters are highly maneuverable, which makes them ideal for working in confined spaces and for collecting detailed data on localized objects and creating an orthophotomap (a geometrically corrected digital image of the terrain, created based on aerial photographs of the landscape) (Figure 3).



Figure 3. Orthophotomap of the area near the future highway

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Satellite receivers, as high-precision tools in geodesic control of road and transport building, provide a clear planimetric and elevational reference for both axial and off-axis points of highway bridge structures. The base station, equipped with a radio modem, is installed on the highway section under construction. The rover receiver, with a GPS antenna on a mast and a radio antenna, is mounted on the road construction machine. Even in unfavorable conditions, the grader's position can be monitored with an accuracy of 2–3 cm, and the accuracy of height measurements, which are carried out using laser equipment, is ±2–3 mm. Modern road building machines equipped with geodetic equipment significantly increase the speed of planned work and the accuracy of the implemented design solutions.

Engineering and geodesic surveys in road construction under winter conditions are carried out taking into account: snow cover, ground freezing, low temperatures, and short daylight hours. In winter, the micro-relief may be hidden by the snow cover, so partial clearing is often required; it is permissible to carry out surveying when the snow depth is no more than 20 cm. Tacheometric surveying (with an electronic tacheometer) under winter conditions is carried out in the form of a prismless survey (over short distances), and the stability of the tripod on frozen ground is carefully monitored. Data from ground-based laser scanning make it possible to separate "snow" from "relief" based on the density of the point cloud and to build a digital terrain model adjusted for the thickness of the snow cover.

The integration of traditional geodesic and the latest electronic methods makes it possible to create comprehensive digital terrain models, which become the basis for design in a computer-aided design environment and subsequent geodetic support for road and transport construction [14, 15]. Modern electronic total stations are integrated optical-information systems for obtaining geodesic information, on the basis of which digital terrain models are created. One of the directions for developing geodetic measurement methods is the creation of software that makes it possible to combine data obtained using the global positioning method and data obtained with electronic total stations. During the building of the subgrade and road structure of the motorway section, operational geodesic control was necessarily carried out (Table 1).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Table 1

Geodetic operational control of road and transport building of the M-12 highway section in Bashkortostan

Type of work	Controlled parameter	Deviation (GOST 33324-2015)	The method used
Construction of the earthwork	Deviation of surface elevations from the design values	± 50 mm	Leveling of the rods every 20 meters
Soil compaction	Layer thickness	± 20 mm	Tacheometric surveying
Laying the bottom layer of the base	Height deviation	± 15 mm	Leveling with spirit levels
Laying the top layer of the coating	Surface smoothness	≤ 3 mm	Measuring the rack clearance

Among the promising trends in the development of geodesic surveys in road and transport building, it is worth noting highly intelligent robotic systems that can independently survey the terrain along a highway and analyze data using artificial intelligence [15-17]. In addition, digital modeling technologies are being used more extensively; they make it possible to create virtual copies of objects before the construction of highways begins, which allows engineers and designers to plan work more accurately and avoid errors at early stages.

Competent mastery of traditional methods of geodesic surveys and the ability to work with conventional geodetic instruments (orientation, measuring line lengths, measuring horizontal and vertical angles with theodolites; measuring elevations between picket points with levelers, performing topographic surveys, etc.) allows one to quickly master various types of aerial photography, methods of ground photogrammetry and electronic total station, satellite navigation methods, as well as technologies for automated processing of field measurement results. This will significantly reduce the cost of geodetic support for the road and transport construction processes on the M-12 highway section (Figure 4).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|



Figure 4. Performing topographic surveys

Recently, to ensure traffic safety on speed highways, landscape design is being implemented. It involves smoothly connecting the elements of the highway and harmoniously combining it with the surrounding environment. In addition to the plan and longitudinal profile, it requires the creation of a terrain perspective and a landscape-architectural plan [18, 19]. For landscape design, additional aerial photography (perspective, panoramic, colour) and ground-based stereophotogrammetric surveying of complex road sections are carried out during the survey process.

It should also be noted that engineering and geodesic measurements are carried out directly on the landscape in various physical and geographical conditions, so it is necessary to take care to protect the ecosystem of the surrounding environment: to prevent damage to forests, agricultural lands, and pollution of water resources. In real-world terrain conditions, it is simultaneously difficult to meet the requirements for the plan and profile, as it is necessary to “bend” the highway to bypass populated areas and other obstacles of urban infrastructure, as well as areas with steep relief slopes and unfavorable geological and hydrogeological conditions.

One example of the use of engineering and geodesic surveys is the construction of road bridges along the M-12 highway section in Bashkortostan: before starting the work, a detailed

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

tacheometric survey of the area is carried out to determine the optimal location for the supports and spans. Many factors are taken into account: the water flow speed, the height of the banks, and the geological features. When choosing the location for the construction of the road bridge, the navigation conditions and the features of the bank relief were taken into account. In addition to the 814-meter-long bridge over the Belaya River near the village of Vostretsovo (Figure 5), the M-12 highway section crosses other smaller rivers, and each water crossing requires its own engineering solutions.



Figure 5. Building of a road bridge across the Belaya river near the village of Vostretsovo, Buraevsky district, Bashkortostan.

The most common soils in the low-lying riverine areas of the M-12 highway section in the north-western regions of Bashkortostan are clayey dispersed soils, the negative feature of which is a sharp decline in their physico-mechanical characteristics when moistened, which significantly reduces the possibility of using them in road and transport construction. To increase the load-bearing capacity and reduce deformations of the soil bases of major highways, various methods of geotechnical consolidation of dispersed soils are available. The introduction of lime-containing binders based on large-scale waste from Bashkortostan into clayey dispersed soil increases its water resistance and mechanical strength [20, 21] of

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

roadbed foundations and reduces the costs of producing road construction materials for speed federal highways by 25-30 %.

One of the leading innovative trends in road construction in the 21st century is the enhancement of environmental friendliness; a promising trend in the implementation of the Russian Federation's national project "Infrastructure for Life" is the reuse of large-tonnage waste. The construction of highways and infrastructure transport facilities requires large volumes of gravel, crushed stone, and other stone materials; in the near future, road and transport construction may become a significant consumer of large-tonnage technogenic waste [22, 23].

By 2030, it is planned to extend the unmanned corridor on the M-12 "Vostok" highway from Kazan to Yekaterinburg, involving additional geodetic surveys. To implement this project, a fully functional intelligent transport infrastructure is being created to ensure control over the operation of unmanned transport [24] on the M-12 motorway by leading mobile and fiber-optic network operators. The use of level-5 unmanned trucks (without drivers in the cab) is possible thanks to the introduction of an experimental legal regime for vehicles and an automated traffic management system. The comprehensive project to integrate virtual modeling of the intelligent transport infrastructure of the M-12 highway with the actual movement of unmanned vehicles paves the way for the mass adoption of autonomous logistics by 2035.

For the smooth operation of the intelligent transport infrastructure [25] of the M-12 "Vostok" highway, with a permitted vehicle speed of up to 120 km/h, it is necessary to ensure complementary and accurate reproduction of the road geometry, road signs, markings, and engineering facilities based on geodetic surveys. The smart system integrates data from sensors with artificial intelligence of the road surface, weather stations, video cameras, and GLONASS satellite navigation to create a real-time updated model of the traffic situation. Unmanned trucks receive information about the condition of the M-12 highway, traffic density, and potential obstacles via 5G networks.

The successful implementation of the transport strategy of the Russian Federation in Bashkortostan is linked to comprehensive geo-urban planning for the development of the economic and logistics infrastructure of the regions and republics between the Volga and the Urals. The growth in domestic tourism volumes [26], as well as the tourist attractiveness of the regions of the Ural federal district, ultimately makes it possible to enhance transport accessibility and mobility, as well as to accelerate the development of various types of health-improving tourism in the recreational complexes of the Republic of Bashkortostan.

In conclusion, it can be stated that engineering and geodesic surveys conducted during the building of highways lay a solid foundation for the safe, comfortable, and cost-effective

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

operation of the road transport infrastructure of the M-12 speed motorway section in Bashkortostan.

References

1. Kochetova E.F. Engineering geodesy in road building. Nizhny Novgorod: NNSABU, 2016. 92 p. EDN QZLPCM.

2. Chudinov S.A., Sharov A.Yu. Engineering geodesy and engineering geodetic support for the building of highways. Yekaterinburg: Publ. USFTU, 2023. 211 p. EDN WXRXCB.

3. Shestakov N.I., Fedyuk R.S., Chertes K.L. Assessment of the level of impact of road construction facilities during design // Bulletin of the engineering school university. 2024. No. 2(59). P.119-126. EDN RZZTHH.

4. Khalikov R.M., Ivanova O.V., Pavlov S.Yu. et al. Innovative technologies in the construction of the Dyurtuli–Achit section of the M-12 federal highway // Trends in science and education. 2024. No.108-13. P.62-65. EDN SKRIKH.

5. Glazachev A.O., Pavlov S.Yu., Ivanova O.V. et al. Stabilization of weak soil foundations for highways // Trends in science and education. 2024. No.109-15. P.27-30. EDN IYXTMM.

6. Pronina L.A., Stolbov Y.V., Uvarov A.I. et al. Substantiated and interrelated technical tolerances needed in regulatory documents on the construction of roads and their geodetic support // Internat. Conf. "Complex Equipment". Saint-Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019. V.1384. P.012043. EDN WXLXNY.

7. Moshkov V.B., Tskhovrebov E.S., Kalaeva S.Z. et al. Analysis of violations of environmental requirements on highways that lead to threats of emergency situations // World of Transport. 2024. V.22, No.1(110). P.86-92. EDN JNJWFM.

8. Stolbov Yu.V., Stolbova S.Yu., Pronina L.A. et al. Research into the accuracy of the elevation position of a road surface using various geodesic instruments // Bulletin SibADI. 2018. V.15, No.1(59). P.97-105. EDN YTMCNJ.

9. Ivasyk D.V., Vasilchenko A.A., Kokarev K.V. Innovations in modern geodesy in road and airfield building // Engineering bulletin of the Don. 2018. No.2(49). P.163. EDN YATGBF.

10. Katkalo Yu.A., Tuluevsky N.V., Drozdov D.N. et al. Application of electronic total stations for quality control of work in the construction of highways // Bulletin of the Belarusian-Russian University. 2015. No.3(48). P.143-151. EDN UIBGAT.

11. Ivanova O.V., Glazachev A.O., Khalikov R.M. et al. Efficient operation of road transport during the construction of a four-lane section of the M-12 speed highway // Modern prospects of science and technology: Coll. of the 3rd Internat. Conf. Voronezh: Publ. “Universitet. book”, 2025. P.164-167. EDN BRKUBU.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

12. Sholomitsky A.A., Kosarev N.S., Nikonov A.V. et al. Study of the accuracy of measuring lengths using laser rangefinders of electronic tacheometers // Bulletin of the Siberian State University of geosystems and technologies. 2024. V.29, No.5. P.59-68. EDN KYIJVF.

13. Baglikova T.E., Popov B.A., Kostylev V.A. Analysis of the use of unmanned technologies in geodesy // Environmental management and nature use of geolandscapes. 2022. No.2. P.22-25. EDN CEKZHD.

14. Paveleko A.A. Technologies for designing highways based on computer-aided design systems // Bulletin IMSIT. 2023. No.1(93). P.53-56. EDN PGBBPF.

15. Ivanova O.V., Glazachev A.O., Pavlov S.Yu. et al. The demanded application of artificial intelligence in traffic management on the Dyurtuli–Achit section of the M-12 highway // Prospects of technologies: Coll. 3rd All-Russian Conf. Voronezh: Publ. “Universit. book”, 2025. P.167-170. EDN FXSQLT.

16. Zubarev V.A., Oznemets V.V. Comparative analysis of the practical application of a total station and a ground-based laser scanning system in a geodesic control // Spatial data: science and technology. 2025. V.16, No.4. P.79-93. EDN IWEJVH.

17. Ivanova O.V., Pavlov S.Yu., Glazachev A.O. et al. Effective operation of intelligent transport infrastructure in the operation of vehicles on speed highways // Modern technologies and innovations: Coll. 2nd Intern. Conf. Voronezh: VSTU, 2026. P.174-177. EDN RXVZJG.

18. Zimina Ya.S., Shchegoleva N.V. Landscape design – a modern approach to the building of highways // Resource-energy-efficient technologies in the regional construction sector. 2014. No.4. P.386-389. EDN TJCAVD.

19. Jang W., Lee S.K., Heon S. Sustainable performance index for assessing the green technologies in urban infrastructure projects // Journal of Management in Engineering. 2018. V.34. No.2. P.41-68.

20. Glazachev A.O., Pavlov S.Yu., Shaykhullin I.R. et al. Resource-saving methods for strengthening weak soils in the bases of road surfaces of highways // Trends of science and education. 2024. No.105-13. P.10-13. EDN NZOMXA.

21. Latypova Z.B., Khalikov R.M., Glazachev A.O. et al. Geoecological aspects of using lime-containing large-scale soda production waste in Bashkortostan // Problems of region ecology. 2023. No.4. P.68-72. EDN ZFOTOL.

22. Slobodchikova N.A., Klyuev S.V., Plyuta K.V. et al. The use of industrial waste in strengthening roadway soil // Proceed. of the St. Petersburg Transport University. 2024. V.21, No.4. P.775-786. EDN MGHOTL.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

23. Khalikov R.M., Pavlov S.Yu., Glazachev A.O. et al. Supramolecular mechanism for strengthening clay foundations of highways // Trends of science and education. 2024. No.107-9. P.83-85. EDN KUSVZT.

24. Ivanova O.V., Pavlov S.Yu., Glazachev A.O. et al. Innovative unmanned vehicle operation technologies in speed federal highways // Modern innovations in engineering and technology: Collection of the Internat. Conf. Kursk: Publ. "Univer. book", 2025. P.139-142. EDN XOADRL.

25. Khalikov R.M., Ivanova O.V., Latypova Z.B. et al. Optimized functioning of the intelligent transport infrastructure of speed highways // International Journal of Professional Science. 2026. No.3-2. P.230-239. EDN JAMOGG.

26. Abdurakhmanova L.R. The Impact of transport infrastructure on the development of tourism in Russia // Power of Systems. 2019. No.1(10). P.17-20. EDN HXWFQV.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 628.1/.2:725.8

Voinova D.A., Zaitsev N.S. Comparison of water supply and sewerage design approaches for large sports complexes in Saint Petersburg and Abu Dhabi

Сопоставление подходов к проектированию систем водоснабжения и водоотведения крупных спортивных комплексов Санкт-Петербурга и Абу-Даби

Voinova Daria Aleksandrovna
master's student, Department of Engineering Design,
Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Russia, Saint Petersburg
Zaitsev Nikita Sergeevich
scientific adviser, Cand. Sc. (Economics), Associate Professor,
Department of Engineering Design,
Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Russia, Saint Petersburg
Войнова Дарья Александровна
магистрант, кафедра инженерного проектирования,
Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет),
РФ, г. Санкт-Петербург
Зайцев Никита Сергеевич
научный руководитель, к.э.н., доцент кафедры инженерного проектирования,
Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет),
РФ, г. Санкт-Петербург

Abstract. *A large sports complex differs from other public buildings in the sharply peaked profile of its water demand and in the presence of process flows comparable in volume to domestic ones. The paper compares design approaches using the SKA Arena in Saint Petersburg and the Etihad Arena in Abu Dhabi. It is shown that the differences stem neither from technical capability nor, any longer, from a regulatory prohibition: the Russian code of practice has permitted the reuse of greywater and rainwater since 2024. The decisive factor is the presence of an approval procedure linking design consent to water conservation targets. Six transferable solutions are formulated.*

Keywords: *sports facilities, water supply, sewerage, water reuse, greywater, ice arena, water conservation.*

Аннотация. *Крупный спортивный комплекс отличается от прочих общественных зданий пиковой неравномерностью водопотребления и наличием технологических потоков, сопоставимых по объёму с хозяйственно-питьевыми. В работе сопоставлены проектные подходы на примере комплексов «СКА Арена» в Санкт-Петербурге и Etihad Arena в Абу-Даби. Показано, что различия определяются не техническими возможностями и уже не нормативным запретом: отечественный свод правил допускает повторное использование серых и атмосферных вод с 2024 года. Определяющим оказывается наличие разрешительной процедуры, увязывающей согласование проекта с достижением показателей водосбережения. Сформулированы шесть решений, пригодных для переноса.*

Ключевые слова: *спортивные сооружения, водоснабжение, водоотведение, повторное использование воды, серые сточные воды, ледовая арена, водосбережение.*

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published - https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Введение

Крупный спортивный комплекс представляет собой особый тип потребителя воды. От прочих общественных зданий он отличается тремя признаками. Водопотребление носит пиковый характер: в межсобытийные дни оно близко к нулю, в день мероприятия основная часть суточного расхода приходится на три-четыре часа. Наряду с хозяйственно-питьевыми потоками действуют технологические — заливка и восстановление льда, ванны бассейнов, подпитка систем холодоснабжения, увлажнение и осушение воздуха, — причём их объём сопоставим с хозяйственно-питьевым, а требования к качеству воды выше. Наконец, зал трансформируется под разные виды спорта и под концертный формат, и при каждой трансформации состав технологических потоков меняется. Требования к проектированию таких объектов установлены СП 332.1325800.2017 «Спортивные сооружения» [12] и СП 310.1325800.2017 «Бассейны для плавания» [10].

Для сопоставления выбраны два объекта, близких по классу и времени ввода, но построенных в противоположных природных и институциональных условиях. «СКА Арена» введена в эксплуатацию 3 ноября 2023 года в сложившейся застройке Московского района Санкт-Петербурга как реконструкция прежнего спортивно-концертного комплекса [3; 6]. Etihad Arena открыта в январе 2021 года на намывной территории Yas Bay острова Яс в Абу-Даби как новое строительство в составе комплексной застройки [17]. Первый объект работает на поверхностном источнике водоснабжения и сбрасывает сток в развитую городскую систему водоотведения. Второй работает на опреснённой морской воде и сбрасывает сток в систему, построенную заново вместе с районом.

Различия проектных решений принято объяснять природными условиями, однако такое объяснение неполно. СП 30.13330.2020 «Внутренний водопровод и канализация зданий» [8] после введения в действие Изменения № 3 [4] прямо допускает применение технической воды, приготовленной из атмосферных и серых сточных вод, устанавливает требование раздельных систем и маркировки трубопроводов и запрещает соединение таких систем с хозяйственно-питьевым водопроводом. Норма, следовательно, не препятствует; тем не менее в проектной практике отечественных спортивных комплексов подобные решения не применяются. Цель работы — сопоставить подходы к проектированию систем водоснабжения и водоотведения крупных спортивных комплексов в Санкт-Петербурге и Абу-Даби и выделить решения зарубежной практики, применимые в отечественном проектировании. Задачами исследования являются сопоставление исходных условий и нормативных требований,

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

расчётная оценка технологических потоков обоих объектов и составление перечня решений к переносу с указанием препятствий по каждому из них.

Основная часть

Объекты сопоставления. Основные характеристики обоих комплексов и условия их размещения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики сопоставляемых объектов

Признак	«СКА Арена», Санкт-Петербург	Etihad Arena, Абу-Даби
Ввод в эксплуатацию	3 ноября 2023 г.	январь 2021 г.
Вместимость	21 500 зрителей, до 23 000 на концертах	18 000 зрителей
Площадь	189,5 тыс. м² здания, парк 12 га	35 тыс. м²
Условия размещения	сложившаяся застройка, реконструкция прежнего комплекса	намывная островная территория, новое строительство в составе района
Основная спортивная функция	хоккей; трансформируемая ледовая площадка 56×26, 60×28 или 61×30 м	универсальный зал; временный бассейн 25 м для чемпионата мира 2021 г.
Источник водоснабжения	поверхностный (р. Нева), ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	опреснение морской воды
Приёмник сточных вод	городская сеть, тоннельные коллекторы и насосные станции	сеть эмирата с глубоким самотёчным тоннелем STEP
Обязательная экологическая сертификация	отсутствует	Estidama; объекту присвоен уровень 2 Pearl
Источники данных	[3; 6]	[17; 18; 19; 21]

Особенности потребителя. Для обоих объектов диаметры вводов и выпусков определяет не суточный расход, а секундный, приходящийся на перерывы между периодами игры или отделениями концерта, и противопожарный расход, который многократно превышает хозяйственно-питьевой. Этим спортивный комплекс отличается от административного или торгового здания сопоставимой площади, где суточный график сглажен. Второе отличие — доля технологических потоков. Первичная заливка ледового поля размером 61×30 м при толщине льда 40 мм требует около 73 м³ воды, восстановление льда в течение дня мероприятия — ещё 4–5 м³, причём вода для заливки подлежит деминерализации, поскольку растворённые соли снижают прочность и прозрачность льда. Наполнение ванн бассейна требует на порядок большего объёма воды и, в отличие от заливки льда, выполняется однократно с последующей подпиткой.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Способ нормирования расчётных расходов. Первое принципиальное различие состоит в следующем. Отечественная практика нормирует расход со стороны потребителя: приложение А СП 30.13330.2020 [8] задаёт удельные нормы водопотребления на зрителя, спортсмена, работника и условное блюдо, по которым определяется расчётный расход, а СП 31.13330.2021 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» [9] устанавливает требования к наружным сетям. Практика Абу-Даби нормирует расход со стороны водоразборной арматуры: система Estidama [21] задаёт предельные расходы смесителей, душевых сеток и смывных устройств, а зачётные требования раздела «Precious Water» формулируются как процент снижения относительно базовой линии, рассчитанной по тем же помещениям при арматуре базового расхода. Первый способ отвечает на вопрос, сколько воды потребуется; второй — на вопрос, насколько меньше воды потребуется по сравнению с типовым решением. Второй способ побуждает проектировщика к поиску решений, первый такого стимула не создаёт.

Обязательность экологического нормирования. Система Estidama действует в Абу-Даби как обязательная: любое новое здание должно получить не менее одного уровня Pearl, здание, финансируемое из бюджета, — не менее двух [21]. Etihad Arena аттестована на уровень 2 Pearl [17]. Аттестация встроена в разрешительную процедуру: без неё проект не согласовывается. В Российской Федерации «зелёные» стандарты применяются добровольно и на состав проектной документации не влияют, поэтому решения по водосбережению остаются на усмотрение заказчика и в условиях бюджетного финансирования обычно исключаются как удорожающие. Это различие носит не технический, а процедурный характер, и именно оно определяет, будут ли применены решения, которые норма уже допускает.

Повторное использование воды. В Абу-Даби обращение с очищенными сточными водами регулируется регламентом Recycled Water and Biosolids Regulations 2021 [22], а сброс производственных стоков — регламентом Trade Effluent Control Regulations 2022 [24]. Очищенные сточные воды подаются потребителям по самостоятельной распределительной сети и используются для полива, технологических нужд и подпитки систем охлаждения. Масштаб задачи виден из данных регулятора: установленная мощность систем централизованного холодоснабжения эмирата составляет около 600 тыс. холодильных тонн, а их подпитка требует порядка 150 тыс. м³ опреснённой воды в сутки, что соответствует примерно 5 % суточного спроса эмирата на воду; принятая в 2023 году политика прямо предписывает рассматривать очищенные сточные и морские воды как источник подпитки [15]. Отечественная норма [8] с учётом Изменения № 3 [4] допускает приготовление технической воды из

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

атмосферных и серых сточных вод по заданию на проектирование при условии раздельных систем водоснабжения и водоотведения, маркировки трубопроводов и запрета соединения с хозяйственно-питьевым водопроводом; санитарные требования к таким системам определяются СанПиН 2.1.3684-21 [5]. Таким образом, различие состоит не в наличии разрешения, а в наличии стимула.

Технологические потоки и трансформация зала. Сопоставление удобно выполнить на двух событиях, каждое из которых потребовало подготовки зала. В декабре 2021 года в Etihad Arena проводился чемпионат мира по плаванию в 25-метровом бассейне: в зале были смонтированы соревновательная и разминочная ванны, монтаж занял 14 суток, вокруг ванн устроен временный настил площадью 3000 м² с отметкой 2,2 м, а наполнение соревновательной ванны выполнено за 47 часов [18; 19]. Приняв размеры соревновательной ванны 25×25 м при глубине 2,0 м, отвечающие требованиям СП 310.1325800.2017 [10], получаем объём (1) и средний расход наполнения (2):*

$$V = L \cdot B \cdot h = 25 \cdot 25 \cdot 2{,}0 = 1250\ \text{м}^3 \quad (1)$$

$$q = \frac{V}{T} = \frac{1250}{47} \approx 26{,}6\ \text{м}^3/\text{ч} \approx 7{,}4\ \text{л/с} \quad (2)$$

Полученный расход невелик и обеспечивается вводом умеренного диаметра, однако объём превышает потребность в воде на первичную заливку ледового поля «СКА Арены» примерно в семнадцать раз, а опорожнение ванн после соревнований создаёт залповый сброс, который принимает наружная сеть. Существенно, что оба объекта решают одну задачу: зал должен принимать технологические системы, отсутствующие в его постоянном оснащении. Отсюда следует требование, которое целесообразно включать в задание на проектирование: предусмотреть в конструкциях зала постоянный набор присоединений для временных технологических систем. В его состав входят:

– точки наполнения с расчётным расходом не ниже принимаемого для наибольшей из предусматриваемых ванн;
– линии опорожнения с пропускной способностью, обеспечивающей нормативную продолжительность слива, и с возможностью регулирования сброса в наружную сеть;

[1]Проектная документация обоих объектов в открытом доступе отсутствует. Приведённые характеристики представляют собой подтверждённые открытые данные. Объёмы, расходы и производительность по конденсату рассчитаны автором как модельные задачи по действующим сводам правил при принятых исходных данных; эти значения носят оценочный характер и предназначены для сопоставления порядков величин, а не для воспроизведения фактических проектных решений.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

- трапы и лотки в зоне арены с уклонами, сохраняемыми при устройстве временного настила;
- точки присоединения установок водоподготовки и обеззараживания с резервированием электрической мощности;
- приборы учёта на каждой из перечисленных линий;
- закладные детали и гильзы в конструкциях, исключающие штрабление при монтаже временных систем.

Конденсат систем осушения как ресурс. Ледовая арена круглогодично осушает воздух, поскольку выпадение конденсата на поверхности льда и ограждающих конструкциях недопустимо. Осушение даёт непрерывный поток конденсата — практически деминерализованной воды, то есть именно того качества, которое требуется для заливки льда. Производительность по конденсату определяется выражением (3):

$$W = \frac{G \cdot \rho \cdot (d_1 - d_2)}{1000} \quad (3)$$

где G — расход осушаемого воздуха, м³/ч; ρ — плотность воздуха, кг/м³; d_1 и d_2 — влагосодержание воздуха до и после осушения, г/кг сухого воздуха. При расходе 100 000 м³/ч, плотности 1,2 кг/м³ и снижении влагосодержания на 5 г/кг получаем (4):

$$W = \frac{100\,000 \cdot 1{,}2 \cdot 5}{1000} = 600 \text{ кг/ч} \approx 14{,}4 \text{ м}^3/\text{сут} \quad (4)$$

Полученная величина втрое превышает суточную потребность в воде на восстановление льда, оценённую выше в 4–5 м³. Иными словами, ледовая арена способна покрывать эту потребность собственным конденсатом, а при накоплении в резервуаре — и часть потребности в воде на первичную заливку. Решение требует обеззараживания, поскольку конденсат подвержен биологическому загрязнению, и раздельной сети с маркировкой согласно СП 30.13330.2020 с учётом Изменения № 3 [4; 8], однако не требует ни новых технологий, ни изменения норм. В практике объектов Абу-Даби сбор конденсата систем кондиционирования применяется как штатное решение, что объясняется как климатом, так и стоимостью опреснённой воды.

Поверхностный сток. Здесь сравнение даёт обратный результат: перенимать следует не техническое решение, а вывод, сделанный по итогам событий апреля 2024 года. Санкт-Петербург располагает развитой ливневой канализацией, расчёт которой ведётся по методу предельных интенсивностей согласно СП 32.13330.2018 «Канализация. Наружные сети и сооружения» [11] при интенсивности q_{20} = 60 л/(с·га) и периоде однократного превышения расчётной интенсивности, назначаемом по таблицам свода правил. Абу-Даби и Дубай до недавнего времени практически не имели

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

развитой ливневой сети, поскольку осадки считались редкими. В апреле 2024 года выпадение свыше 140 мм осадков за сутки привело к масштабным затоплениям, после чего в Дубае утверждена программа «Тасриф» стоимостью 30 млрд дирхамов, предусматривающая семикратное увеличение пропускной способности системы водоотвода [20], в Абу-Даби объявлены конкурсы на проектирование и строительство систем отвода поверхностного стока и понижения уровня подземных вод [23], а требования к расчёту закреплены руководством Dubai Municipality по проектированию систем отвода поверхностного стока [16]. Вывод для отечественной практики состоит в том, что для объектов с массовым единовременным пребыванием людей период однократного превышения расчётной интенсивности целесообразно принимать выше минимального табличного значения: подтопление подходов и эвакуационных путей при заполненном зале влечёт последствия, несоразмерные экономии на пропускной способности коллектора. Вопросы оптимизации городских систем водоотвода рассмотрены в работе Гу Ченгруна [1].

Наружное водоотведение. Схемы приёма стока различаются принципиально. Система водоотведения Санкт-Петербурга сочетает тоннельные коллекторы глубокого заложения с большим числом канализационных насосных станций [2], что связано с равнинным рельефом и историей развития сети. В Абу-Даби реализован глубокий самотёчный тоннель STEP протяжённостью около 40 км с диаметром проходки порядка 7 м и шахтами глубиной от 40 до 80 м, отводящий сток самотёком на очистные сооружения Аль-Ватба при среднем расходе 800 тыс. м³/сут [14]. Самотёчный принцип позволяет обойтись без промежуточных насосных станций на всём протяжении тоннеля. Для отдельного объекта различие проявляется в условиях присоединения: самотёчная схема снимает ограничения по режиму сброса, тогда как схема с насосными станциями требует согласования залповых сбросов, характерных для спортивного комплекса. Перенос такого решения на уровень отдельного объекта невозможен, однако при выборе точки присоединения и при обосновании режима сброса это различие следует учитывать.

Противопожарное водоснабжение. Требования к наружному и внутреннему противопожарному водоснабжению установлены СП 8.13130.2020 «Наружное противопожарное водоснабжение» [13] и СП 10.13130.2020 «Внутренний противопожарный водопровод» [7]; расчётный расход определяется по объёму здания, степени огнестойкости и классу функциональной пожарной опасности, а необходимый запас воды — по расчётной продолжительности тушения. Свод правил ОАЭ (UAE Fire and Life Safety Code of Practice) [25] построен на основе американских стандартов и определяет расход через классификацию помещений по пожарной нагрузке и через

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

параметры автоматических установок пожаротушения. Для спортивного комплекса оба подхода приводят к сопоставимым по порядку величинам, но структура расчёта различна, поэтому прямое сравнение проектных решений двух объектов по этому разделу некорректно, а заимствование нецелесообразно: противопожарные требования относятся к национальной системе технического регулирования и переносу не подлежат.

Сопоставление подходов. Результаты по основным признакам сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Сопоставление подходов к проектированию

Признак	Санкт-Петербург	Абу-Даби
Способ нормирования расчётного расхода	удельные нормы на потребителя (СП 30.13330.2020 [8])	предельные расходы арматуры и процент снижения относительно базовой линии [21]
Статус экологического нормирования	добровольный, на состав документации не влияет	обязательный: не ниже 1 Pearl, для бюджетных объектов — не ниже 2 Pearl [21]
Повторное использование серых и атмосферных вод	допускается по заданию на проектирование [4; 8]	является условием получения зачётных баллов, применяется повсеместно [22]
Вода на полив и технологические нужды	питьевого качества либо из поверхностного источника	очищенные сточные воды по самостоятельной сети [22]
Сбор конденсата систем кондиционирования	не нормируется, применяется единично	штатное решение, учитывается в водном балансе
Подпитка систем холодоснабжения	индивидуальные системы объекта	централизованное холодоснабжение; источник подпитки регулируется политикой 2023 г. [15]
Ливневая канализация	развитая сеть, расчёт по методу предельных интенсивностей [11]	сеть создаётся заново по программам, принятым после 2024 г. [16; 20; 23]
Схема наружного водоотведения	тоннельные коллекторы и насосные станции [2]	глубокий самотёчный тоннель STEP [14]
Противопожарное водоснабжение	расчёт по объёму и степени огнестойкости [7; 13]	расчёт по классификации помещений и параметрам установок [25]
Учёт водопотребления	общий и групповой	пофункциональный, с раскрытием данных при аттестации
Проверка проектных решений	государственная экспертиза	согласование регулятора при ответственности консультанта

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Решения, пригодные для переноса. Из рассмотренного отобраны решения, которые не требуют изменения отечественных норм и применимы на объекте, сопоставимом со «СКА Ареной». Каждое сопровождается указанием нормативного основания и препятствия, ограничивающего применение (таблица 3).

Таблица 3

Решения, пригодные для переноса в отечественную практику

Решение	Содержание	Нормативное основание	Препятствие
Нормирование по результату	задание на проектирование фиксирует целевое снижение расчётного водопотребления относительно базовой линии, рассчитанной при арматуре базового расхода	СП 30.13330.2020 [8] в части решений, принимаемых по заданию на проектирование	отсутствие обязательной процедуры и утверждённой базовой линии
Сбор конденсата систем осушения на нужды заливки льда	конденсат собирается в резервуар, обеззараживается и подаётся на восстановление льда по отдельной сети	Изменение № 3 [4] к СП 30.13330.2020 [8]; СанПиН 2.1.3684-21 [5]	отсутствие типовых решений и подтверждённой практики согласования
Раздельная сеть технической воды	вода из атмосферных и серых стоков подаётся на смыв и полив по отдельной маркированной сети без соединения с хозяйственно-питьевым водопроводом	Изменение № 3 [4] к СП 30.13330.2020 [8]	усложнение эксплуатации; отсутствие тарифного стимула
Постоянный набор присоединений для временных технологических систем	точки наполнения, опорожнения, трапы, присоединения водоподготовки и приборы учёта закладываются на стадии проектной документации	СП 310.1325800.2017 [10] и СП 332.1325800.2017 [12] в части решений по заданию на проектирование	не нормируется; требует решения заказчика на ранней стадии
Пофункциональный учёт водопотребления	приборы учёта по зонам — арена, зрительская часть, предприятия питания, технологические системы — с передачей данных в систему эксплуатации	СП 30.13330.2020 [8]	добровольный характер; отсутствие требований к раскрытию данных
Повышенный период однократного превышения для ливневой канализации	для объектов с массовым единовременным пребыванием людей период принимается выше минимального табличного значения	СП 32.13330.2018 [11]	удорожание; отсутствие прямого требования

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Заключение

Сопоставление комплексов «СКА Арена» и Etihad Arena подтверждает положение, вынесенное во введении: различия проектных решений по системам водоснабжения и водоотведения объясняются природными условиями лишь отчасти. Природные условия определяют источник воды и приёмник стока — поверхностный источник и развитую городскую сеть в Санкт-Петербурге против опреснения и заново построенной системы в Абу-Даби. Однако решения, составляющие содержательное различие, — повторное использование серых и атмосферных вод, самостоятельная сеть технической воды, сбор конденсата — отечественной нормой не запрещены: свод правил допускает их с января 2024 года при условии раздельных систем и маркировки трубопроводов.

Определяющим оказывается не техническое и не нормативное, а процедурное различие. В Абу-Даби аттестация по системе Estidama обязательна и встроена в разрешительную процедуру, поэтому водосбережение является условием согласования проекта, а не предметом усмотрения заказчика. В Российской Федерации соответствующие стандарты добровольны, и в условиях бюджетного финансирования решения по водосбережению исключаются как удорожающие. Второе следствие сопоставления касается способа нормирования: отечественная норма отвечает на вопрос о потребном расходе, зарубежная — на вопрос о его снижении относительно типового решения, и только второй способ побуждает проектировщика к поиску.

Для крупного спортивного комплекса выделены шесть решений, пригодных для переноса без изменения норм: нормирование по результату, сбор конденсата систем осушения на нужды заливки льда, раздельная сеть технической воды, постоянный набор присоединений для временных технологических систем, пофункциональный учёт водопотребления и повышенный период однократного превышения для ливневой канализации. Расчётная оценка показывает, что конденсат систем осушения ледовой арены способен покрывать суточную потребность в воде на восстановление льда с трёхкратным запасом, а требование к присоединениям для временных систем следует из сопоставления двух событий — трансформации ледовой площадки и монтажа временных ванн бассейна. Опыт Абу-Даби и Дубая по поверхностному стоку показывает и обратное: занижение расчётного периода однократного превышения для объектов с массовым пребыванием людей приводит к последствиям, несоразмерным экономии на диаметре коллектора.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

References

1. Гу Ченгрун. Исследование оптимизации городских муниципальных дренажных систем // Молодой учёный. – 2026. – № 20 (623). – С. 93–96. – URL: https://moluch.ru/archive/623/136438 (дата обращения: 24.08.2026).

2. ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга». Главные проекты. – URL: http://www.vodokanal.spb.ru/o_kompanii/glavnye_proekty/ (дата обращения: 24.08.2026).

3. На месте СКК на проспекте Гагарина завершили строительство ледовой арены // Канонер. 07.11.2023. – URL: https://kanoner.com/2023/11/07/178051/ (дата обращения: 24.08.2026).

4. Приказ Минстроя России от 18.12.2023 № 935/пр «Об утверждении Изменения № 3 к СП 30.13330.2020 “СНиП 2.04.01-85* Внутренний водопровод и канализация зданий”»: введено в действие 19.01.2024. – URL: https://legalacts.ru/doc/prikaz-minstroja-rossii-ot-18122023-n-935pr-ob-utverzhdenii/ (дата обращения: 24.08.2026).

5. СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению населения: утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 3. – URL: https://docs.cntd.ru/document/573536177 (дата обращения: 24.08.2026).

6. «СКА Арена»: о стадионе (основные характеристики). – URL: https://arena-ska.ru/o-stadione (дата обращения: 24.08.2026).

7. СП 10.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Внутренний противопожарный водопровод. Нормы и правила проектирования. – URL: https://docs.cntd.ru/document/565415344 (дата обращения: 24.08.2026).

8. СП 30.13330.2020. Внутренний водопровод и канализация зданий. СНиП 2.04.01-85*: утв. приказом Минстроя России от 30.12.2020 № 920/пр; действует с Изменениями № 1–5 (Изменение № 5 — приказ от 17.01.2025). – URL: https://docs.cntd.ru/document/573741260 (дата обращения: 24.08.2026).

9. СП 31.13330.2021. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84*: утв. приказом Минстроя России от 27.12.2021 № 1016/пр; с Изменениями № 1 и № 2 (приказ от 28.11.2025 № 761/пр, введено с 01.01.2026). – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_412750/ (дата обращения: 24.08.2026).

10. СП 310.1325800.2017. Бассейны для плавания. Правила проектирования: утв. приказом Минстроя России от 26.12.2017 № 1716/пр; введён 27.06.2018; с

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Изменениями № 1–3. – URL: https://docs.cntd.ru/document/556522748 (дата обращения: 24.08.2026).

11. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения. СНиП 2.04.03-85: утв. приказом Минстроя России от 25.12.2018 № 860/пр; с Изменениями № 1–5 (последнее — приказ от 28.11.2025 № 760/пр, введено с 01.01.2026). – URL: https://docs.cntd.ru/document/554820821 (дата обращения: 24.08.2026).

12. СП 332.1325800.2017. Спортивные сооружения. Правила проектирования: утв. приказом Минстроя России от 14.11.2017 № 1536/пр; с Изменениями № 1–4. – URL: https://docs.cntd.ru/document/556793895 (дата обращения: 24.08.2026).

13. СП 8.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Наружное противопожарное водоснабжение. Требования пожарной безопасности (с Изменением № 1). – URL: https://docs.cntd.ru/document/565391175 (дата обращения: 24.08.2026).

14. Abu Dhabi Deep Sewer Tunnel // Webuild Group. – URL: https://www.webuildgroup.com/en/projects/dams-hydroelectric-plants/deep-sewer-tunnel/ (дата обращения: 24.08.2026).

15. Abu Dhabi Department of Energy unveils the ‘Water Management in District Cooling Plants’ policy // Department of Energy, Abu Dhabi. 18.01.2023. – URL: https://www.doe.gov.ae/Media-Centre/News/Abu-Dhabi-Department-of-Energy-unveils-the-Water-Management-in-District-Cooling-Plants-policy (дата обращения: 24.08.2026).

16. Dubai Municipality. Stormwater Design Guidelines. January 2025. – URL: https://www.dm.gov.ae/wp-content/uploads/2025/01/DM_Stormwater-Guidelines-F.24.01.25.pdf (дата обращения: 24.08.2026).

17. Etihad Arena // HOK. – URL: https://www.hok.com/projects/view/etihad-arena/ (дата обращения: 24.08.2026).

18. Etihad Arena ready to host FINA World Swimming Championships // Gulf Today. 14.12.2021. – URL: https://www.gulftoday.ae/sport/2021/12/14/etihad-arena-ready-to-host-fina--world-swimming-championships (дата обращения: 24.08.2026).

19. Etihad Arena’s Fina pool set to host swimming championships // Trade Arabia. – URL: http://www.tradearabia.com/news/CONS_390878.html (дата обращения: 24.08.2026).

20. Mohammed bin Rashid approves AED30 billion «Tasreef» project to enhance Dubai’s rainwater drainage capacity by 700 % // UAE Media Office. 24.06.2024. – URL: https://www.mediaoffice.ae/en/news/2024/june/24-06/mohammed-bin-rashid-approves-aed30-billion-tasreef-project (дата обращения: 24.08.2026).

21. Pearl Building Rating System: Design & Construction. Version 1.0. Abu Dhabi: Abu Dhabi Urban Planning Council, 2010. – URL: https://pages.dmt.gov.ae/en/Urban-Planning/Pearl-Building-Rating-System (дата обращения: 24.08.2026).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

22. Recycled Water and Biosolids Regulations 2021. 3rd ed. Abu Dhabi: Department of Energy, 2021. – URL: https://www.doe.gov.ae/-/media/Project/DOE/Department-Of-Energy/Media-Center-Publications/Regulations/English/Recycled-Water--Biosolids-Regulations-2021-Edition-3.pdf (дата обращения: 24.08.2026).

23. Storm infrastructure upgrade for Abu Dhabi goes out to tender // AGBI. 10.2024. – URL: https://www.agbi.com/infrastructure/2024/10/storm-infrastructure-upgrade-for-abu-dhabi-goes-out-to-tender/ (дата обращения: 24.08.2026).

24. Trade Effluent Control Regulations 2022. Abu Dhabi: Department of Energy, 2022. – URL: https://www.doe.gov.ae/-/media/Project/DOE/Department-Of-Energy/Media-Center-Publications/Regulations/English/Trade-Effluent-Control-Regulations-2022.pdf (дата обращения: 24.08.2026).

25. UAE Fire and Life Safety Code of Practice. Directorate General of Civil Defence, 2018. – URL: https://www.dcd.gov.ae/portal/eng/UAEFIRECODE_ENG.pdf (дата обращения: 24.08.2026).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 628.1/.2:001.892

Voinova D.A., Zaitsev N.S. Design methods for water supply and sewerage systems in dense urban development and large metropolitan areas: the cases of Saint Petersburg and Dubai

Способы проектирования инженерных систем водоснабжения и водоотведения в условиях плотной городской застройки и крупных мегаполисов на примере Санкт-Петербурга и Дубая

Voinova Daria Aleksandrovna
master's student, Department of Engineering Design,
Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Russia, Saint Petersburg
Zaitsev Nikita Sergeevich
scientific adviser, Cand. Sc. (Economics), Associate Professor,
Department of Engineering Design,
Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Russia, Saint Petersburg
Войнова Дарья Александровна
магистрант, кафедра инженерного проектирования,
Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет),
РФ, г. Санкт-Петербург
Зайцев Никита Сергеевич
научный руководитель, к.э.н., доцент кафедры инженерного проектирования,
Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет),
РФ, г. Санкт-Петербург

Abstract. *Metropolitan networks are not designed from scratch, so the cost of a design error increases through indirect losses for the city, while in Saint Petersburg the design horizon of the approved water supply and sewerage scheme has expired. The paper compares two models of design regulation — the Russian prescriptive-normative model and the model based on regulator design guidelines — together with hydraulic modelling, BIM and digital twin tools. It is shown that differences in design decisions are only partly explained by natural conditions: the regulatory model and the financing method exert comparable influence. Three elements of the Dubai procedure suitable for transfer into Russian practice are formulated.*

Keywords: *engineering systems design, hydraulic modelling, building information modelling, digital twin, life-cycle cost, Saint Petersburg, Dubai.*

Аннотация. *Сети мегаполиса проектируют не с чистого листа, поэтому цена проектной ошибки возрастает за счёт косвенных издержек для города, а в Санкт-Петербурге расчётный период утверждённой схемы водоснабжения и водоотведения истёк. В работе сопоставлены две модели регулирования проектной деятельности — российская нормативно-предписывающая и построенная на руководящих документах регулятора, — а также инструменты гидравлического моделирования, ТИМ и цифровых двойников. Показано, что различия проектных решений лишь отчасти объясняются природными условиями: сопоставимое влияние оказывают модель регулирования и способ финансирования. Сформулированы три элемента дубайской процедуры, пригодные для переноса в отечественную практику.*

Ключевые слова: *проектирование инженерных систем, гидравлическое моделирование, информационное моделирование, цифровой двойник, стоимость жизненного цикла, Санкт-Петербург, Дубай.*

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Введение

Проектирование сетей мегаполиса и сетей малого города — разные задачи, и различие носит качественный характер. Во-первых, сеть проектируется не с чистого листа, а как приращение или реконструкция системы, которая работает десятилетиями. Во-вторых, решение по одному объекту меняет режим работы всей системы. В-третьих, цена ошибки выше, поскольку к прямым затратам добавляются косвенные издержки для городской экономики.

Санкт-Петербург и Дубай удобны для сравнения именно своей контрастностью. Санкт-Петербург — исторический город, централизованный водопровод которого был заложен в середине XIX века, с поверхностным источником водоснабжения, слабыми водонасыщенными грунтами, высоким уровнем подземных вод и жёсткими ограничениями по сохранности объектов культурного наследия. Дубай сформировался преимущественно за последние 50 лет, полностью зависит от опреснения морской воды, расположен в аридной зоне на себховых и песчаных грунтах, имеет исторически напорную схему водоотведения и практически не имел до недавнего времени системы ливневой канализации. Сопоставление этих систем позволяет отделить универсальные принципы от решений, продиктованных местными условиями.

Цель работы — сопоставить методические подходы и инструментальные средства проектирования систем водоснабжения и водоотведения в двух контрастных по природным и институциональным условиям мегаполисах и выделить элементы зарубежной практики, применимые в отечественном проектировании.

Основная часть

Уровни проектирования. Проектирование идёт по нескольким уровням, каждый из которых детализирует решения предыдущего и одновременно ограничен ими. Уровни и их наполнение в обеих системах приведены в таблице 1.

Таблица 1

Уровни проектирования и их содержание

Уровень	Российская Федерация (Санкт-Петербург)	Дубай (ОАЭ)
Стратегический	Генеральный план города; схема водоснабжения и схема водоотведения (ФЗ № 416-ФЗ [10], ПП РФ № 782 от 05.09.2013 [17]). Для Санкт-Петербурга утверждена постановлением Правительства СПб от 11.12.2013 № 989 [11] на период до 2025 г. с учётом перспективы до 2030 г. Расчётный период истёк, новая редакция на 17.08.2026 не утверждена	Dubai Urban Master Plan 2040; отраслевые мастер-планы Dubai Municipality и DEWA

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Уровень	Российская Федерация (Санкт-Петербург)	Дубай (ОАЭ)
Программный	Инвестиционная программа ресурсоснабжающей организации, программа комплексного развития систем коммунальной инфраструктуры	Капитальные программы Dubai Municipality и DEWA, в том числе по модели PPP / DBFO
Проектный	Проектная документация по ПП РФ от 16.02.2008 № 87 (ред. от 21.10.2025); государственная экспертиза	Concept Design → Preliminary (30 %) → Detailed Design (60/90/100 %) с обязательными value engineering workshops и согласованием DM / DEWA / RTA
Рабочий	Рабочая документация, авторский надзор	Shop drawings, IFC drawings

Институционально подходы расходятся в следующем. В России проектная документация проходит обязательную государственную экспертизу на соответствие техническим регламентам и сводам правил. В Дубае контроль устроен иначе: согласование со всеми владельцами сетей и утверждение проекта заказчиком-регулятором, при этом ответственность за инженерные решения в большей степени несёт консультант-проектировщик.

Предписывающее нормирование и нормирование по критериям. Российская школа опирается на своды правил, которые задают и расчётные методики, и конкретные предписывающие требования: свод правил по водоснабжению [21] и свод правил по водоотведению [22], оба в действующей редакции с изменениями. Удельное водопотребление, коэффициенты неравномерности, наполнения, скорости и минимальные уклоны прописаны прямо в тексте, а соответствие им проверяет экспертиза.

Дубайская модель построена на design guidelines — руководящих документах, издаваемых регулятором [7; 8; 9]. Расход сточных вод принимается равным примерно 80 % от расчётного водопотребления, установленного DEWA, при эквивалентной удельной норме 280 л/чел·сут. Минимальная самоочищающая скорость в самотечном коллекторе составляет не менее 0,75 м/с при расчётном наполнении, максимальная — не более 2,5 м/с. Расчётное наполнение d/D принимается в пределах 0,50–0,70 для диаметров до 500 мм, 0,50–0,65…0,70 для 500–800 мм и 0,50–0,65 для диаметров свыше 800 мм. Гидравлический расчёт выполняется по формуле Колбрука — Уайта либо Маннинга, а минимальный уклон определяется по двум критериям — самоочищающей скорости и минимальному касательному напряжению порядка 1,5 Па, из которых принимается больший. Минимальная глубина заложения составляет 1,2 м до верха трубы, при наличии бетонной защиты — 0,5 м, при пересечении дорог бестраншейным способом — не менее 2,5 м; вертикальный просвет до водопровода составляет 0,5 м,

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published - https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

до кабельных сетей — 0,3 м, минимальное горизонтальное расстояние между сетями — 3 м. Рекомендуемая максимальная глубина заложения равна 10–12 м, при большей глубине проектировщик обязан рассмотреть вариант с насосной станцией. Отдельно нормируется расчётный срок службы активов по типам сооружений — принцип, отсутствующий в явном виде в российских сводах правил, — и обязательно проектируются системы контроля запаха на насосных станциях при расчётной средней концентрации сероводорода 50 ppm и остаточной концентрации на выпуске менее 1 ppm.

Обязательным элементом дубайской процедуры является value engineering workshop: по каждой сессии оформляется отчёт, альтернативные варианты разбираются критически, а глубина заложения коллектора и размещение насосных станций выбираются в том числе по минимуму стоимости жизненного цикла. В российской практике такая процедура необязательна и регламентом не закреплена.

Гидравлическое и гидродинамическое моделирование. Главным методическим изменением последних двадцати лет стал переход от поверочного расчёта отдельного участка к имитационному моделированию всей системы. Свободно распространяемый комплекс EPANET получил статус фактического отраслевого стандарта расчёта напорных систем подачи и распределения воды: он определяет расходы по участкам, узловые напоры, распространение примесей, концентрацию остаточного хлора и «возраст» воды, обеспечивая расчёт альтернативных сценариев [24]. Коммерческие комплексы Bentley WaterGEMS и WaterCAD построены на том же ядре и интегрируются с ArcGIS, AutoCAD и MicroStation, поддерживая калибровку модели, оптимизацию диаметров, анализ пожарных расходов и зонирование сети. Гидродинамическое моделирование самотечных и напорно-самотечных систем водоотведения и ливневой канализации выполняется в DHI MIKE URBAN, MIKE+ и Innovyze InfoWorks ICM с решением полных уравнений Сен-Венана и моделированием подпоров, переливов и взаимодействия «сеть — поверхность» при подтоплениях; дождевой сток и совмещённые системы моделируются в SWMM. Отечественные решения [6; 14] включают ИСС «Zulu Hydro» и «ZuluDrain», «CityCom-ГидроГраф» и модули гидравлического расчёта в составе nanoCAD BIM ВК.

Наибольший эффект модели дают при обосновании реконструкции: калиброванная модель позволяет сравнить в цифрах перекладку с увеличением диаметра, санацию с сохранением диаметра, строительство дублирующей нитки и установку регулирующей ёмкости, а затем выбрать решение с наименьшими приведёнными затратами. Применительно к Дубаю имитационное моделирование

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

послужило основой обоснования перехода от насосной схемы к самотечной в рамках программы DSST.

Информационное моделирование, ГИС и цифровые двойники. В Российской Федерации формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства обязательно для объектов, финансируемых с привлечением бюджетных средств [16]. Для линейных объектов водоснабжения и водоотведения информационная модель решает несколько задач [9]: автоматизированный поиск коллизий с существующими сетями и конструкциями, что существенно при плотности 10–15 сетей в поперечном профиле улицы; автоматическое формирование спецификаций и объёмов работ с увязкой модели со сметой; моделирование последовательности производства работ и стеснённых условий площадки, включая обоснование схем перекрытия движения; передачу атрибутивной информации в систему эксплуатации. В Дубае обязательность BIM введена циркулярами Dubai Municipality для зданий определённой этажности и площади, а для крупных инфраструктурных проектов требование о применении технологий информационного моделирования закрепляется условиями контракта; на проектах уровня DSST и Tasreef применяется полный цикл информационного моделирования с единой средой хранения и обмена данными.

Геоинформационная система водоканала связывает проектирование с эксплуатацией: в ней хранятся фактическая топология сети, паспортные данные, история аварий и ремонтов, результаты телеинспекции. Связывание ГИС, гидравлической модели, телеметрии и системы управления активами формирует цифровой двойник — среду, в которой проектное решение проверяется на реальных эксплуатационных данных ещё до начала строительства. Сходные подходы описаны и применительно к системам водоотведения, где информационная модель служит основой для гидравлических расчётов и построения автоматизированной системы управления водоотведением [2]. К наиболее развитым областям применения цифровых двойников относятся управление давлением и снижение неучтённых расходов воды, прогнозирование аварийности и приоритизация участков для реконструкции, а также оперативное управление ливневыми и совмещёнными системами в периоды выпадения интенсивных осадков.

Стоимость жизненного цикла как критерий. Обе школы движутся в одну сторону: критерий оптимальности смещается от минимума сметной стоимости строительства к минимуму приведённых затрат за жизненный цикл, включающих капитальные вложения, эксплуатационные затраты, прежде всего электроэнергию на перекачку, затраты на ремонт и реконструкцию, а также остаточную стоимость. Для систем водоотведения мегаполиса основную долю эксплуатационных издержек

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

формируют энергозатраты на перекачку, что послужило экономическим обоснованием перехода к самотечной схеме глубокого заложения в дубайской практике.

Проектная практика Санкт-Петербурга. Система водоотведения города включает свыше 9,4 тыс. км канализационных сетей, около 279 км тоннельных коллекторов и более 240 канализационных насосных станций [3]. Водоснабжение более 5,3 млн жителей обеспечивают девять водопроводных станций, крупнейшие из которых — Главная, Северная и Южная. Источником водоснабжения служит река Нева, что определяет специфику водоподготовки и высокую чувствительность системы к качеству поверхностного источника. Проектирование ограничивают слабые водонасыщенные глинистые грунты и погребённые торфа, высокий уровень подземных вод, склонность пылеватых песков к переходу в плывунное состояние, историческая застройка на ленточных бутовых и деревянных свайных фундаментах, обладающая повышенной чувствительностью к дополнительным осадкам, а также охранные зоны объектов культурного наследия и метрополитена.

Отдельно следует отметить состояние стратегического уровня документации. Схема водоснабжения и водоотведения Санкт-Петербурга утверждена постановлением Правительства Санкт-Петербурга от 11.12.2013 № 989 на период до 2025 года с учётом перспективы до 2030 года и трижды актуализировалась в 2015, 2021 и 2023 годах [11; 26]. По состоянию на август 2026 года расчётный период схемы истёк, а новая редакция не утверждена. Между тем именно схема служит основанием для разработки и утверждения инвестиционных программ ресурсоснабжающих организаций, поэтому разрыв в её актуализации напрямую ослабляет обоснование проектных решений на нижележащих уровнях.

В качестве характерного объекта рассмотрен Главный канализационный коллектор северной части города — магистраль от канализационной насосной станции на Зольной улице до Северной станции аэрации протяжённостью 24,2 км [1; 3; 4]. При его строительстве, завершённом в основном объёме в 2013 г., применялась закрытая механизированная проходка, позволившая вести работы в условиях плотной городской застройки без вскрытия дорожного полотна и перекладки смежных коммуникаций. Следует отметить терминологическую неточность отраслевых публикаций, в которых эти работы именуются микротоннелированием: при диаметрах тоннелей 4,0–4,5 м и глубинах заложения до 90 м речь идёт о щитовой проходке тоннелепроходческим механизированным комплексом, поскольку микротоннелирование по определению предполагает дистанционно управляемую проходку без присутствия персонала в выработке при диаметрах не более 3 м. Проходка выполнялась на глубинах до 90 м, для обеспечения работ было устроено несколько десятков вертикальных шахтных стволов.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

В настоящее время реализуется строительство второй нитки первого участка протяжённостью около 12 км диаметром 4,5 м.

Проектные особенности, обусловленные местными условиями, состоят в следующем. Глубокое заложение с выходом в устойчивые нижнекембрийские глины продиктовано непригодностью верхней толщи четвертичных отложений для проходки. Обязателен геотехнический прогноз влияния проходки на осадки зданий с назначением зоны влияния и системы мониторинга [19]. Проходка с активным пригрузом забоя применяется как основное техническое решение при работе в водонасыщенных грунтах, а число шахтных стволов минимизируется, поскольку каждый требует отдельного участка на поверхности и согласований. Изношенные распределительные сети восстанавливают бестраншейно: типовое решение — замена чугуна 1960–1970-х годов на полиэтилен методами санации или разрушения старой трубы, нередко с увеличением диаметра, например со 150 до 225 мм; приоритет бестраншейных методов при реконструкции прямо закреплён в своде правил [23].

Проектная практика Дубая. Водоснабжение Дубая практически полностью обеспечивается опреснением морской воды. Совокупная производительность опреснительных установок DEWA составляет порядка 495 MIGD с планом увеличения до 735 MIGD к 2030 г.; пиковый спрос в 2024 г. достигал 455 MIGD [20]. Стратегическим направлением является переход от термических методов к обратному осмосу с питанием от возобновляемых источников: проект Hassyan мощностью 180 MIGD реализуется по модели независимого производителя воды и является крупнейшим в мире объектом такого рода, использующим технологию обратного осмоса [21]. Отсюда проектная установка, которой нет в Петербурге: кубометр воды здесь стоит существенно дороже, поэтому распределительную сеть проектируют прежде всего под минимум потерь и энергозатрат, а очищенные сточные воды для орошения и технических нужд считают полноценным вторым источником водоснабжения и проектируют под них отдельную напорную сеть. Геотехнические условия определяются себховыми грунтами прибрежной зоны, представляющими собой переслаивание песков, глин и эвапоритов, высокосжимаемыми и агрессивными по отношению к бетону и арматуре, в сочетании с высокоминерализованными подземными водами [27; 29], что обусловливает применение коррозионностойких материалов и предъявление специальных требований к бетону.

– DSST — крупнейший в регионе инфраструктурный проект в области водоотведения. Содержание программы составляет замена исторически сложившейся насосной схемы, включающей более сотни насосных станций, самотечной системой глубоких тоннелей. Общая протяжённость превышает 200

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

км глубоких тоннелей плюс сети присоединительных трубопроводов; две системы тоннелей завершаются терминальными насосными станциями при очистных сооружениях в районах Джебель-Али и Варсан. Пакет J1 включает около 42 км тоннелей и 10 км присоединительных трубопроводов, пакет W — 16 км тоннелей и 46 км трубопроводов. Глубина заложения достигает 90 м при диаметре тоннелей от 3 м. Оценки стоимости составляют около 25 млрд дирхамов, порядка 6,8 млрд долл. США, по капитальным затратам и до 80 млрд дирхамов, порядка 22 млрд долл. США, с учётом затрат жизненного цикла в модели ГЧП. Расчётный срок службы системы превышает 100 лет, реализация ведётся по модели DBFO с 25–35-летним периодом эксплуатации концессионером [12; 13; 15; 25].*

Методически DSST показателен тем, что принципиальную схему системы задал критерий стоимости жизненного цикла: отказ от сотен насосных станций экономит электроэнергию, сокращает персонал и снижает затраты на реновацию, и это окупает капитальные вложения в глубокие тоннели, которые в разы выше. Модель ГЧП с длительным эксплуатационным периодом институционально закрепляет ответственность проектировщика и подрядчика за эксплуатационные показатели.

Экстремальные осадки апреля 2024 г. показали, что существующая система поверхностного водоотвода не справляется. В июне 2024 г. утвердили программу Tasreef стоимостью 30 млрд дирхамов со сроком реализации до 2033 г. [18; 28]. Программа предусматривает увеличение пропускной способности сети ливневой канализации на 700 %, до более чем 20 млн м³/сут, при расчётном расходе системы 230 м³/с; по этому показателю система является крупнейшей в регионе системой сбора дождевого стока в едином контуре. Применяются глубокие самотечные тоннели с пропускной способностью отдельного тоннеля до 4 м³/с, что обеспечивает снижение капитальных и эксплуатационных затрат на насосные станции примерно на 20 %, а выпуск осуществляется в море через подводные трубопроводы, в частности по проекту DS411 длиной 4,0 км диаметром 2 м с пропускной способностью 9 м³/с [5]. Схема Tasreef представляет собой переход от локальных решений по водоотводу к системному, предусматривающему единый контур сбора, глубокий транспортный тоннель и морской выпуск; одновременно она решает проблему подъёма уровня подземных вод в застроенных районах.

[2]Расхождение оценок объясняется разной базой счёта, а не противоречием в данных: 6,8 млрд долл. США — капитальные затраты на строительство, тогда как 22 млрд долл. США — совокупная стоимость за весь жизненный цикл в модели государственно-частного партнёрства, включая эксплуатацию концессионером в течение 25–35 лет. Напрямую эти величины сопоставлять некорректно.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Сравнительный анализ подходов. Результаты сопоставления сведены в таблицу 2. Сравнение ведётся по двенадцати признакам: от источника водоснабжения и типа регулирования до модели финансирования и критерия оптимальности. Признаки подобраны так, чтобы за каждым стояло конкретное проектное следствие, а не общая характеристика города.

Таблица 2

Сопоставление подходов к проектированию систем водоснабжения и водоотведения в Санкт-Петербурге и Дубае

Признак	Санкт-Петербург	Дубай
Источник водоснабжения	поверхностный (р. Нева), водоподготовка	опреснение морской воды, TSE как второй источник
Тип регулирования	нормативно-предписывающий (своды правил, госэкспертиза)	нормирование по критериям (design guidelines, NOC, ответственность консультанта)
Ключевые документы	СП 31.13330.2021, СП 32.13330.2018, СП 249.1325800.2016, СП 341.1325800.2017, СП 399.1325800.2018, СП 42.13330.2026	DM Sewerage / Stormwater / STP Design Guidelines (ред. 01.2025), Local Order № 8/2002, DEWA Water Regulations
Нормирование расхода стоков	по удельному водопотреблению и коэффициентам неравномерности	80 % от водопотребления DEWA; 280 л/чел·сут
Гидравлические критерии	нормированные наполнения и минимальные скорости самоочищения	v = 0,75…2,5 м/с; d/D = 0,50…0,70; двойной критерий уклона
Определяющий геотехнический фактор	слабые водонасыщенные грунты, плывуны, высокий УГВ, осадки исторической застройки	себховые грунты, высокая минерализация подземных вод, коррозионная агрессивность
Преобладающие материалы труб	ПЭ100, ВЧШГ, железобетон с футеровкой, стеклопластик	GRP, HDPE, uPVC, MDPE; RCC с полимерной футеровкой
Доминирующая схема водоотведения	смешанная (самотечно-напорная), исторически совмещённая канализация в центре	переход от преимущественно напорной к глубокой самотечной
Флагманский проект	ГКК северной части, 24,2 км, щитовая проходка, глубина до 90 м, Ø 4,0–4,5 м	DSST — свыше 200 км тоннелей; Tasreef — 230 м³/с ливневого стока
Модель финансирования	бюджет и инвестиционная программа ГУП	ГЧП (DBFO), концессия на 25–35 лет
Обязательность ТИМ/BIM	ПП РФ № 331 от 05.03.2021 (бюджетные объекты)	циркуляры DM с 2015 г.; контрактное требование на крупных проектах
Критерий оптимальности	преимущественно сметная стоимость строительства	стоимость жизненного цикла, обязательный value engineering

Заключение

Сопоставление проектных практик Санкт-Петербурга и Дубая показывает, что различия в проектных решениях лишь отчасти объясняются природно-климатическими

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

и геотехническими условиями; сопоставимое влияние оказывают институциональная модель регулирования и способ финансирования проекта. Государственно-частное партнёрство с длительным эксплуатационным периодом выступает самостоятельным инструментом смещения проектных решений в сторону минимума стоимости жизненного цикла. Общим для обоих городов является переход от проектирования отдельного объекта к проектированию системы: крупные решения обосновываются на калиброванной гидравлической модели системы в целом с расчётом сценариев её развития.

Из дубайской практики целесообразно заимствовать три элемента. Первый — обязательный регламентированный этап value engineering с документированным сопоставлением альтернатив. Второй — явное нормирование расчётного срока службы активов по типам сооружений. Третий — применение критерия минимальной стоимости жизненного цикла как основного при выборе принципиальной схемы, а не только при сравнении равнозначных вариантов.

Для Санкт-Петербурга ключевым направлением развития методики проектирования является интеграция геотехнического прогноза, то есть расчёта осадок застройки при проходке, непосредственно в информационную модель линейного объекта: тогда риски видны на ранней стадии, а выбор между открытым и закрытым способом получает обоснование. Опыт Дубая по проектированию систем повторного использования очищенных сточных вод в качестве самостоятельного источника водоснабжения применим и в отечественной практике, прежде всего для технического водоснабжения промышленных потребителей и полива, что снижает нагрузку на системы питьевого водоснабжения. Отдельного внимания требует истёкший расчётный период схемы водоснабжения и водоотведения Санкт-Петербурга: её актуализация является условием обоснованности решений на программном и проектном уровнях.

References

1. Главный канализационный коллектор г. Санкт-Петербурга // Объекты STIS. – URL: http://stis.com.ru/objects/objects/497/ (дата обращения: 16.08.2026).

2. Гу Ченгрун. Исследование оптимизации городских муниципальных дренажных систем // Молодой учёный. – 2026. – № 20 (623). – С. 93–96. – URL: https://moluch.ru/archive/623/136438 (дата обращения: 17.08.2026).

3. ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга». Строительство Главного канализационного коллектора. – URL: https://www.vodokanal.spb.ru/presscentr/news/stroitelstvo_glavnogo_kanalizacionnogo_koll

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

ektora_rabochie_montiruyut_shahty_dlya_prokladki_tonnelya_diametrom_45_m/ (дата обращения: 16.08.2026).

4. Использование компьютерных комплексов моделирования работы сетей и сооружений. – URL: https://ros-pipe.ru/tekh_info/tekhnicheskie-stati/vodoprovodnye-sistemy-i-oborudovanie/ispolzovanie-kompyuternykh-kompleksov-modelirovani/ (дата обращения: 16.08.2026).

5. Об утверждении схемы водоснабжения и схемы водоотведения Санкт-Петербурга на период до 2025 года с учётом перспективы до 2030 года: постановление Правительства Санкт-Петербурга от 11.12.2013 № 989 (в редакции постановлений от 25.09.2015 № 856, от 29.06.2021 № 437, от 10.05.2023 № 420). – URL: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/ingen/shemy-razvitiya-inzhenerno-energeticheskogo-kompleksa/shema-vodosnabzheniya-i-vodootvedeniya/ (дата обращения: 17.08.2026).

6. Орлов В.А., Аверкеев И.А. Анализ автоматизированных программ расчёта водопроводных сетей в целях гидравлического моделирования при реновации трубопроводов // Вестник МГСУ. – 2013. – С. 237–243. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-avtomatizirovannyh-programm-rascheta-vodoprovodnyh-setey-v-tselyah-gidravlicheskogo-modelirovaniya-pri-renovatsii-1 (дата обращения: 17.08.2026).

7. Постановление Правительства РФ от 05.03.2021 № 331 «Об установлении случая, при котором застройщиком, техническим заказчиком… обеспечиваются формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства».

8. Постановление Правительства РФ от 05.09.2013 № 782 «О схемах водоснабжения и водоотведения». – URL: https://base.garant.ru/70447444/ (дата обращения: 16.08.2026).

9. Рыльцева Ю.А. Информационное моделирование систем водоснабжения и водоотведения // Строительство: наука и образование. – 2024. – С. 100–118. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnoe-modelirovanie-sistem-vodosnabzheniya-i-vodootvedeniya (дата обращения: 17.08.2026).

10. СП 249.1325800.2016. Коммуникации подземные. Проектирование и строительство закрытым и открытым способами. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200138447 (дата обращения: 16.08.2026).

11. СП 31.13330.2021. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84*: утв. приказом Минстроя России от 27.12.2021 № 1016/пр. Действует с Изменением № 1 (приказ Минстроя России от 26.12.2024 № 926/пр, дата введения 27.01.2025) и Изменением № 2 (приказ Минстроя

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

России от 28.11.2025 № 761/пр, введено с 01.01.2026). – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_412750/ (дата обращения: 17.08.2026).

12. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения. СНиП 2.04.03-85: утв. приказом Минстроя России от 25.12.2018 № 860/пр. Действует с Изменениями № 1–5: № 1 — приказ от 23.12.2019 № 839/пр; № 2 — приказ от 27.12.2021 № 1023/пр (введено с 28.01.2022); № 3 — приказ от 28.12.2023 № 1009/пр; № 4 — приказ от 17.01.2025 № 17/пр (введено с 25.02.2025); № 5 — приказ от 28.11.2025 № 760/пр (введено с 01.01.2026). – URL: https://docs.cntd.ru/document/554820821 (дата обращения: 17.08.2026).

13. СП 399.1325800.2018. Системы водоснабжения и канализации наружные из полимерных материалов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/552304873 (дата обращения: 16.08.2026).

14. Схема водоснабжения и схема водоотведения Санкт-Петербурга // Официальный сайт Администрации Санкт-Петербурга. – URL: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/ingen/shemy-razvitiya-inzhenerno-energeticheskogo-kompleksa/shema-vodosnabzheniya-i-vodootvedeniya/ (дата обращения: 16.08.2026).

15. Федеральный закон от 07.12.2011 № 416-ФЗ «О водоснабжении и водоотведении».

16. DEWA wins Middle East and Africa Deal of the Year 2024 award for Hassyan desalination plant project // DEWA. 07.2025. – URL: https://www.dewa.gov.ae/en/about-us/media-publications/latest-news/2025/07/dewa-wins-prestigious-pfi-award (дата обращения: 16.08.2026).

17. Dubai launches landmark subsea project to tackle rising groundwater and boost urban resilience // Smart Water Magazine. – URL: https://smartwatermagazine.com/news/smart-water-magazine/dubai-launches-landmark-subsea-project-tackle-rising-groundwater-and-boost (дата обращения: 16.08.2026).

18. Dubai Municipality launches tender for $22 billion sewerage project // Smart Water Magazine. – URL: https://smartwatermagazine.com/news/smart-water-magazine/dubai-municipality-launches-tender-22-billion-sewerage-project (дата обращения: 16.08.2026).

19. Dubai Municipality. Sewerage Design Guidelines. Doc. No. DM-WSA-SRPD-SEW2. January 2025. – URL: https://www.dm.gov.ae/wp-content/uploads/2025/01/comp-DM_Sewerage-Guidelines-F.24.01.25.pdf (дата обращения: 16.08.2026).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

20. Dubai Municipality. Sewerage Treatment Plant Design Guidelines. January 2025. – URL: https://www.dm.gov.ae/wp-content/uploads/2025/01/DM_STP-Guidelines-F.24.01.25.pdf (дата обращения: 16.08.2026).

21. Dubai Municipality. Stormwater Design Guidelines. January 2025. – URL: https://www.dm.gov.ae/wp-content/uploads/2025/01/DM_Stormwater-Guidelines-F.24.01.25.pdf (дата обращения: 16.08.2026).

22. Dubai Selects Teams for Key Contracts of $22B Sewer Tunnel Megaproject // Engineering News-Record. – URL: https://www.enr.com/articles/63257-dubai-selects-teams-for-key-contracts-of-22b-sewer-tunnel-megaproject (дата обращения: 16.08.2026).

23. Dubai Strategic Sewerage Tunnels (DSST) project // Tunnelbuilder. – URL: https://tunnelbuilder.com/News/Dubai-Strategic-Sewerage-Tunnels-DSST-project.aspx (дата обращения: 16.08.2026).

24. Dubai tenders first two packages of £17bn sewerage tunnels project // Ground Engineering. 09.04.2025. – URL: https://www.geplus.co.uk/news/dubai-tenders-first-two-packages-of-17bn-sewerage-tunnels-project-09-04-2025/ (дата обращения: 16.08.2026).

25. Dubai’s desalinated water production rises by 4.6 % to meet increasing demand // DEWA. 11.2024. – URL: https://www.dewa.gov.ae/en/about-us/media-publications/latest-news/2024/11/dubais-desalinated-water-production (дата обращения: 16.08.2026).

26. EPANET // Рувики. – URL: https://ru.ruwiki.ru/wiki/EPANET (дата обращения: 16.08.2026).

27. Hydrochemical characterization of groundwater to align with sustainable development goals in the Emirate of Dubai, UAE // Environmental Earth Sciences. 2018. – URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-018-8030-1 (дата обращения: 16.08.2026).

28. Mohammed bin Rashid approves AED30 billion «Tasreef» project to enhance Dubai’s rainwater drainage capacity by 700 % // UAE Media Office. 24.06.2024. – URL: https://www.mediaoffice.ae/en/news/2024/june/24-06/mohammed-bin-rashid-approves-aed30-billion-tasreef-project (дата обращения: 16.08.2026).

29. Sustainable groundwater control system for environmental and geotechnical problems in Sabkha soils in arid regions // Discover Sustainability. 2025. – URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s43621-025-01187-9 (дата обращения: 16.08.2026).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 54

Guzenko O.A., Kuznetsov V.V. Development of packaging materials with the incorporation of silver nanoparticles

Разработка упаковочных материалов с внедрением наночастиц серебра

Guzenko Oksana Alexandrovna
PhD student of the Department of Inorganic Chemistry
Ivanovo State University of Chemistry and Technology
Kuznetsov Vladimir Vasilyevich
Professor, Doctor of Chemistry
Ivanovo State University of Chemistry and Technology
Гузенко Оксана Александровна
Аспирант кафедры неорганической химии
Ивановский государственный химико-технологический университет
Кузнецов Владимир Васильевич
Профессор, доктор химических наук
Ивановский государственный химико-технологический университет

Abstract. *Preserving food quality is a pressing challenge facing modern chemistry. One effective method for maintaining food quality is storage in packaging with antibacterial properties. Our team has developed methods for producing food packaging with antibacterial properties. Silver nanoparticles, synthesized via a "green" method using dandelion root extract, were incorporated into the film material structure as an antimicrobial agent. Additionally, a method for applying a silver nanoparticle solution to kraft packaging paper using ultrasound was investigated. The protective efficacy of the developed packaging material was evaluated using perishable foods and bakery products as test subjects. Mechanical property parameters were determined for the films containing incorporated silver nanoparticles.*

Keywords: *Biodegradable packaging materials, antibacterial properties, antimicrobial agent, silver nanoparticles, food products, "green" synthesis.*

Аннотация. *Сохранение качества продуктов питания – актуальная задача, которая стоит перед современной химией. Одним из эффективных способов сохранить качество продуктов питания является их хранение в упаковках с антибактериальными свойствами. Нашей командой были разработаны методики получения упаковок для пищевых продуктов с антибактериальными свойствами. В качестве антимикробного агента в структуру пленочного материала включали наночастицы серебра, синтезированные «зеленым» методом с экстрактом корня одуванчика. Кроме того, был рассмотрен способ нанесения раствора наночастиц серебра на упаковочную крафтовую бумагу с использованием ультразвука. Определена эффективность защиты разработанным упаковочным материалом пищевой продукции в процессе хранения на примере скоропортящихся продуктов и продуктов хлебобулочного производства. Установлены показатели механических свойств пленок, полученных с внедрением в их структуру наночастиц серебра.*

Ключевые слова: *Биоразлагаемые упаковочные материалы, антибактериальные свойства, антимикробный агент, наночастицы серебра, продукты питания, синтез «зеленым» методом.*

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Введение

Питание – один из основных факторов, определяющих состояние здоровья, работоспособность человека, устойчивость его организма к действию определенных факторов окружающей среды. В настоящие дни проблеме питания уделяется большое значение, поскольку продукты, выпускаемые как отечественными, так и импортными производителями, не всегда обладают высокими потребительскими характеристиками за счет использования консервантов и других видов пищевых добавок, продлевающих срок годности, весомо удешевляющих и ухудшающих конечный продукт. Кроме того, интенсивное развитие пищевой промышленности и глобальная конкуренция в данной сфере привели к неограниченному ассортименту продовольственных товаров [1]. Согласно сведениям Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН, более трети всех выпускаемых в мире товаров продовольственного назначения утилизируются в связи с истечением срока годности или применяются не по назначению. В результате основная задача пищевой промышленности заключается в обеспечении продовольственной безопасности, в том числе – разработке мер продления сроков годности продукта без снижения их пищевой ценности [2].

Материалы и методы

Агар-агар – природный полимер, синтезируемый красными водорослями класса Rhodophyceae. Полисахарид состоит из агарозы (50-80%) и агаропектина. Именно нейтральная молекула агарозы в составе агар-агара отвечает за гелеобразование агаровых гидрогелей. Агар-агар относится к классу биоразлагаемых материалов, поэтому отлично подходит в качестве сырья для синтеза упаковок пищевых продуктов, следующих тенденции экологизации потребления. Упаковочные материалы, в основе биополимерной матрицы которых используется агар, характеризуются хорошими физическими свойствами [3]. Среди недостатков выделяют отсутствие антибактериальной активности материала и ограничение гибкости, поэтому в качестве методов улучшения свойств упаковочных пленок используют комбинирование с другими полимерными, влагоудерживающими, антисептическими веществами [4]. В последние годы ведется активная разработка упаковочного нанокомпозитного материала на основе агар-агара с включениями наноцеллюлозы [5] или металлических наночастиц [6].

Композиционные материалы, в структуре которых содержатся нанометровые материалы, называются нанокомпозитами. Малый объем и большая площадь поверхности нанонаполнителя позволяет использовать меньшее количество

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

материала. Металлические наночастицы с сильным антимикробным действием способствуют получению нанокомпозита с микробицидной активностью [7].

Глицерин – представитель трехатомных спиртов, широко применяемый в производстве пищевой и табачной продукции, косметологии, медицине, лакокрасочной и текстильной промышленности. Его используют в производстве упаковочного материала в качестве пластификатора – наполнителя в слоях высокомолекулярных цепей, формирующих каркас полимерного изделия. Глицерин в составе пленок улучшает их физико-механические показатели, способствует предотвращению образования трещин при изгибе, увеличивает эластичность [8].

Поливиниловый спирт широко используется в строительстве, биомедицине, производстве бытовой техники и полимерных упаковочных материалов, поскольку обладает устойчивостью к химическим растворителям, высокой биосовместимостью и удовлетворительными механическими характеристиками. Поливиниловый спирт представляет из себя полукристаллический пластик, отличающийся высокой скоростью поглощения влаги. Предотвратить данную особенность, которая в случае упаковочного материала рассматривается как недостаток, возможно путем комбинирования поливинилового спирта с другими биополимерами (целлюлоза, лигнин, хитозан) [9].

Карбоксиметилцеллюлоза – это производная целлюлозы с $–CH_2–COOH$ – группой, которая присоединяется за счет гидроксильных групп глюкозных мономеров. Широко используется в качестве стабилизатора, наполнителя и загустителя во многих отраслях, в том числе в пищевой, лакокрасочной и парфюмерной промышленности. Полимерные гидрогели карбоксиметилцеллюлозы за счет процесса сшивки поперечных связей между цепями макромолекул переводят в нерастворимое в воде состояние. В качестве сшивающего агента могут выступать экологически безопасные поликарбоновые кислоты, например, лимонная кислота. Действие низких концентраций лимонной кислоты на гидрогели производных целлюлозы в условиях повышенной температуры приводит к формированию полимерных механически стабильных гидрогелей, отличающихся хорошей впитывающей способностью и водопоглощающими свойствами [10].

Хитозан относят к водорастворимым полимерам глюкозамина, отличающимся высокой биосовместимостью и биодеградируемостью. Благодаря натуральности материала, безопасности и функциональным свойствам в последние годы хитозан активно применяют не только в сфере производства упаковочного материала для продуктов питания, но и в самой пищевой промышленности [11]. Хитозан растворим в кислых средах, поэтому для синтеза пленок и волокон с использованием биополимера

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

в качестве растворителя предпочтительно используют водные растворы уксусной кислоты концентрацией 0,5–2,0%.

Методика А – синтез упаковочного материала с использованием агар-агара

В процессе получения пленки использовали порошковый пищевой агар-агар в количестве 5 гр на 100 мл раствора золя с заданной концентрацией наночастиц серебра (0,05 мг/л; 0,1 мг/л; 0 мг/л – контрольный образец). В качестве пластификатора использовали глицерин в количестве 30% и 70% от заданной массы агар-агара в растворе (таблица 1). Полученные образцы выдерживали при температуре 70ºС в условиях постоянного перемешивания в течение 30 минут.

Таблица 1

Соотношение основных компонентов для синтеза активной упаковки с использованием агар-агара

№ образца	Масса глицерина, г	Масса агар-агара, г	Объем золя, мл	Концентрация наночастиц серебра, мкг/л
1	2	3	4	5
1	3,5	5	100	0,1
2	3,5	5	100	0,1
3	3,5	5	100	0
4	4,5	5	100	0,1
5	4,5	5	100	0,1
6	4,5	5	100	0

Полученные растворы отливали в чашки Петри и выдерживали в течение 24 часов при температуре +25-30 ºС до полного высыхания.

Методика В – синтез полимерной упаковки с использованием карбоксиметилцеллюлозы, поливинилового спирта и наночастиц серебра

1. Готовили раствор 3% раствор карбоксиметилцеллюлозы путем растворения навески натрий карбоксиметилцеллюлозы в дистиллированной воде. Выдерживали раствор в течение 12 часов при комнатной температуре.

2. Производили сшивку карбоксиметилцеллюлозы раствором 3% лимонной кислоты. Для этого растворяли 3 гр лимонной кислоты в 100 мл раствора карбоксиметилцеллюлозы с термостатированием при температуре 100 ºС в течение 10 минут.

3. Поливиниловый спирт в количестве 1,2 гр на 28 мл дистиллированной воды растворяли при температуре 80 ºС в условиях постоянного перемешивания. В раствор поливинилового спирта вносили 2 мл золя наночастиц серебра различной концентрации

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

(0,1 мкг/л; 0,05 мкг/л; 0 мкг/л – контрольный образец) и глицерин в различных соотношениях (таблица 2). Смесь перемешивали в течение 30 минут при комнатной температуре, а затем добавляли 10 мл сшитой карбоксиметилцеллюлозы и отливали в чашки Петри. Выдерживали при комнатной температуре в течение 48 часов до полного высыхания [12].

Таблица 2

Соотношение основных компонентов для синтеза активной упаковки с использованием карбоксиметилцеллюлозы и поливинилового спирта

№ образца	Масса глицерина, г	Объем дистиллированной воды, мл	Масса поливинилового спирта, г	Объем раствора гидроксиметилцеллюлозы, мл	Объем золя, мл	Концентрация наночастиц серебра, мкг/л
1	2	3	4	5	6	7
1	2	28	1,2	10	2	0,1
2	1,5	28	1,2	10	2	0,05
3	1,5	28	1,2	10	2	0
4	3	28	2	10	2	0,1
5	3,5	28	2	10	2	0,05
6	3,5	28	2	10	2	0

Методика С – синтез упаковки с использованием хитозана и наночастиц серебра

1. Готовили 3% раствор хитозана путем набухания хитозана в 3% растворе уксусной кислоты.

2. Проводили введение в раствор хитозана золя наночастиц серебра (2 мл), проявляющего антибактериальный эффект. Раствор тщательно перемешивали до достижения эффекта однородности.

3. Глицерин вводили в раствор в качестве влагоудерживающего агента и пластификатора в соответствие с таблицей 3. Полученную смесь подвергали интенсивному перемешиванию при комнатной температуре в течение 10-20 мин.

4. Формовочную смесь наносили путем заливки в чашки Петри с последующим выдерживанием при температуре 60^{o}C в течение 24 часов до достижения пленочной структуры.

5. Не извлекая пленку из чашки Петри в течение 2 часов проводили ее обработку нейтрализующим реагентом, в качестве которого выступал 1М раствор $NH_3 \cdot H_2O$, с последующей промывкой пленки дистиллированной водой до pH≥8. В результате хитозан переходит в водонерастворимую основную форму.

6. Нейтрализованный и промытый пленочный материал сушат при комнатной температуре в течение 24 часов и извлекают из чашек Петри.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Таблица 3

Соотношение основных компонентов для синтеза активной упаковки с использованием хитозана

№ образца	Масса хитозана, г	Объем уксусной кислоты, мл	Масса глицерина, г	Объем золя, мл	Концентрация наночастиц серебра, мкг/л
1	2	3	3	4	5
1	3,5	97	4	2	0,1
2	3,5	97	4	2	0,05
3	4	97	6	2	0,1
4	4	97	6	2	0,05

Метод нанесения наночастиц серебра на упаковочный материал с использованием ультразвука

Ультразвуковые аппараты – это устройства, работающие посредствам энергии упругих волн (с частотой 20 тыс. – 1 млрд. Герц) [13].

Благодаря ультразвуку происходит фиксация коллоидного серебра на поверхности материала. Среди достоинств использования ультразвуковых установок выделяют простоту проведения эксперимента, экономный расход золя и прочное закрепление наночастиц на упаковочном материале [94].

В качестве упаковочного материала использовали крафтовую бумагу для упаковки пищевых продуктов. Крафт-бумага производится из длинноволокнистой сульфатной целлюлозы и отличается высоким коэффициентом прочности. Выбор именно целлюлозной основы объясняется тем, что такой бумажные упаковки для пищевых продуктов более экологически безопасны, гигиеничны и имеют высокую скорость разложения в естественных условиях.

Суть метода заключается в осуществлении следующих этапов:

1. Помещение упаковочной крафт-бумаги в золь наночастиц серебра, синтезированный «зеленым» методом.
2. Проведение ультразвуковой обработки материала в течение 10 минут.
3. Промывка крафт-бумаги дистиллированной водой с целью удаления не закрепленных наноструктур.
4. Высушивание упаковочной крафт-бумаги [14].

Схема осуществления метода представлена на рисунке 1.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

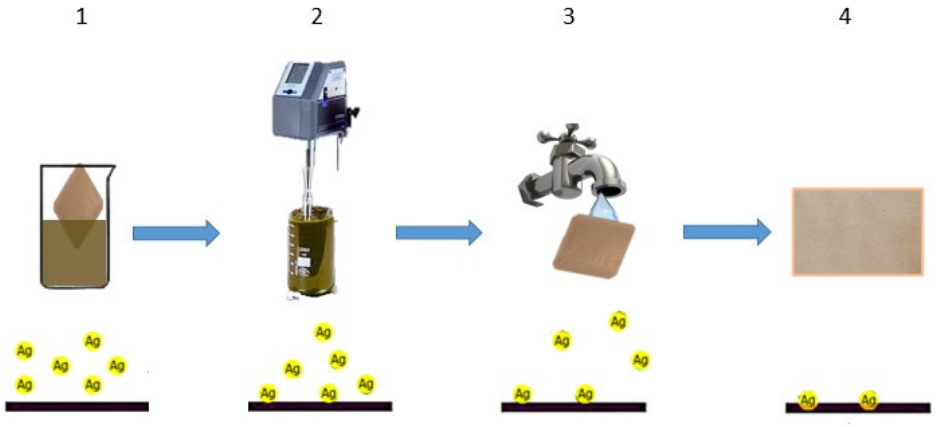


Рисунок 1 – Схема получения материала, который может быть использован при изготовлении упаковки для пищевых продуктов, на основе ультразвуковой обработки

Суть обработки упаковочного материала ультразвуком заключается в разрушении конгломератов наноформ [15] и первичной фиксации на поверхности наносеребра. Эффективность закрепления обуславливается формой, размером наночастиц, пористостью упаковочного материала.

Не зафиксированные в порах крафт-бумаги наночастицы серебра удаляются с материала путем его промывки дистиллированной водой. Сушку упаковки проводят при повышенных температурах для лучшего закрепления коллоидного серебра.

Результаты

Были разработаны упаковочные материалы с включением в качестве активного компонента золей наночастиц серебра, синтезированных с помощью фитоэкстракта корней одуванчика. Проведены исследования по влиянию упаковочного материала с наночастицами серебра на срок хранения пищевых продуктов. В итоге 14-дневного эксперимента пришли к выводу, что пленки с включением коллоидного наносеребра, синтезированного на основе водного экстракта корней одуванчика, оказывают антибактериальное действие и продлевают срок хранения товара в два раза. Оптимальная концентрация наночастиц серебра, не изменяющая на органолептические показатели продукта – 0,05 мг/мл. Кроме того, была проведена оценка проницаемости разработанного упаковочного материала с наночастицами серебра, определена эффективность обеспечения массообмена влаги в процессе хранения. По зависимости изменения массы упакованного продукта от времени установили, что оптимальными влагопроницаемыми свойствами, обеспечивающими минимальные потери влаги в течении 5 дней, обладали пленки из хитозана. Такие упаковочные материалы

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

оптимально подходят для продуктов, склонных к быстрому черствению для предотвращения процесса потери влаги, и сухим товарам, склонным к поглощению влаги из вне. Каждая разработанная нанокомпозитная пленка была охарактеризована с точки зрения ее механических свойств, а именно, определены растворимость, влаго- и водоудерживающая способность и содержание влаги в упаковочном материале.

References

1. Kumar S., Boro J. C., Ray D., Mukherjee A. Bionanocomposite films of agar incorporated with ZnO nanoparticles as an active packaging material for shelf life extension of green grape // Heliyon. V. 5. 2019.

2. Malagurski I., Levic S., Nesic A., Mitric M., Pavlovic V., Dimitrijevic-Brankovic S. Mineralized agar-based nanocomposite films: Potential food packaging materials with antimicrobial properties // Carbohydrate Polymers. V. 175. 2017. P. 55–62.

3. Reddy J. P., Rhim J. W. Characterization of bionanocomposite films prepared with agar and paper-mulberry pulp nanocellulose // Carbohydrate Polymers. V. 110. 2014. P. 480-488.

4. Arfat Y. A., Ahmed J., Jacob H. Preparation and characterization of agar-based nanocomposite films reinforced with bimetallic (Ag-Cu) alloy nanoparticles // Carbohydrate Polymers. V. 155. 2017. P. 382-390.

5. Мукатова М. Д., Сколков С. А., Моисеенко М. С., Киричко Н. А. Пищевая биоразлагаемая пленка с использованием хитозана // Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство. 2018. №3.

6. Yang W., Owczarek J. S., Fortunati E., Kozanecki M., Mazzaglia A., Balestra G. M., Puglia D. Antioxidant and antibacterial lignin nanoparticles in polyvinyl alcohol/chitosan films for active packaging. // Industrial Crops and Products. V. 94. 2016. P. 800–811.

7. Пат. 2 618 329 Российская Федерация, МПК A01N 25/24 Способ получения гидрогелей / Саннино А., Демитри К., Зохар Й., Хэнд Б. Д., Рон Е.С. – № 2013158913/12; заявл. 07.06.12; опубл. 03.05.17; Бюл. № 13. – 3 с.

8. Ультразвуковая обработка конструкционных материалов / А. В. Панин, О. Б. Перевалова, М. С. Казаченок [и др.] ; под редакцией А. В. Панина. — Томск : ТГУ, 2016. — 172 с. — ISBN 978-5-94621-580-0.

9. Raja S., Ramesh V., Thivaharan V., Green biosynthesis of silver nanoparticles using Calliandra haematocephala leaf extract, their antibacterial activity and hydrogen peroxide sensing capability // Arabian Journal of Chemistry. V. 10. 2017. P. 253–261.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

10. Orsuwan, A., Shankar, S., Wang, L.F., Sothornvit, R., Rhim, J.W. Preparation of antimicrobial agar/banana powder blend films reinforced with silver nanoparticles // Food Hydrocolloids. V. 60. 2016. P. 476–485.

11. Vargas C. G., Rios A., Flôres, S. H. Comparative study on the properties of films based on red rice (Oryza glaberrima) flour and starch // Food Hydrocolloids. V. 65. 2017. P. 96–106.

12. Barbasz, A., Kreczmer, B., Oćwieja, M. How the surface properties affect nanocytotoxicity of silver? Study of the three types of nanosilver on two wheat varieties // Acta Physiol. Plant. 2018. P. 31– 40.

13. Kanmani P., Rhim J.W. Physical, mechanical and antimicrobial properties of gelatin based active nanocomposite films containing AgNPs and nanoclay // Food Hydrocolloids. – 2014. – V. 35. – P. 644–652.

14. Vargas C. G., Rios A., Flôres, S. H. Comparative study on the properties of films based on red rice (Oryza glaberrima) flour and starch // Food Hydrocolloids. V. 65. 2017. P. 96–106.

15. Barbasz, A., Kreczmer, B., Oćwieja, M. How the surface properties affect nanocytotoxicity of silver? Study of the three types of nanosilver on two wheat varieties // Acta Physiol. Plant. 2018. P. 31– 40.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

ENERGY AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGIES

UDC 004.8:502.131.1

Karpovich V. Conceptual model for assessing the environmental sustainability of artificial intelligence in the context of the green economy

Концептуальная модель оценки экологической устойчивости искусственного интеллекта в контексте «зелёной» экономики

Karpovich Viktar,
Cand. of Econ. Sc., Asc. Prof., Vice-dean of FMME,
Belarusian National University of Technology
Карпович Виктор Францевич,
канд. экон. наук, доцент, заместитель декана ФММП
Белорусский национальный технический университет

Abstract. *The article examines the problem of assessing the environmental sustainability of artificial intelligence in the context of the green economy. The relevance of the study is determined by the dual environmental effects of AI. On the one hand, the development, training, deployment and operation of AI systems require electricity, water, computing equipment and material resources and generate emissions and waste. On the other hand, AI can contribute to energy savings, resource efficiency, environmental monitoring, emission reductions and optimization of environmental protection activities. The methodological framework is based on a systems approach, life-cycle thinking and multi-criteria environmental assessment. A conceptual system of 25 indicators is developed and grouped into seven blocks: energy efficiency, water efficiency, resource efficiency, circularity, climate and ecosystem impacts, environmental usefulness, and environmental responsibility and transparency. The concepts of environmental burden, environmental usefulness, environmental efficiency and environmental sufficiency of AI use are distinguished. Based on these concepts, a mathematical framework for the Green AI Index (IGAI) is developed. It is demonstrated that the index can only be calculated when functional units, time periods, system boundaries and source data are sufficiently comparable. The empirical validation uses data from Google, Microsoft and the International Energy Agency. The analysis demonstrates that the available datasets refer to different levels of observation, ranging from individual AI queries to data-centre infrastructure and the global data-centre sector. Therefore, their mechanical aggregation into a single statistical index is methodologically inappropriate. The results confirm the applicability of individual blocks of the proposed model and identify the need for a standardized panel dataset for subsequent statistical validation of the integrated index.*

Keywords: *artificial intelligence, environmental sustainability, Green AI, green economy, environmental efficiency, environmental sufficiency, life cycle, environmental burden, environmental usefulness, data centres.*

Аннотация. *В статье исследуется проблема оценки экологической устойчивости искусственного интеллекта в условиях развития «зелёной» экономики. Актуальность исследования определяется двойственным характером воздействия искусственного интеллекта на окружающую среду. С одной стороны, разработка, обучение, развертывание и эксплуатация AI-систем требуют электроэнергии, воды, вычислительного оборудования и материальных ресурсов и сопровождаются формированием выбросов и отходов. С другой стороны, применение AI способно обеспечивать энергосбережение, повышение ресурсной эффективности, экологический мониторинг, снижение выбросов и оптимизацию природоохранных мероприятий. Методологической основой исследования выступают системный подход, концепция жизненного цикла и принципы многокритериальной экологической оценки. Сформирована концептуальная система из 25 показателей, объединённых в семь блоков:*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

энергетическая эффективность, водная эффективность, ресурсная эффективность, циркулярность, климатические и экосистемные воздействия, экологическая полезность, экологическая ответственность и прозрачность. Разграничены понятия экологической нагрузки, экологической полезности, экологической эффективности и экологической достаточности использования искусственного интеллекта. На этой основе разработана математическая модель интегрального индекса Green AI (IGAI). Обосновано, что его расчёт возможен только при обеспечении сопоставимости функциональных единиц, временных периодов, границ системы и исходных данных. Эмпирическая апробация проведена на фактических данных Google, Microsoft и Международного энергетического агентства. Показано, что доступные данные характеризуют различные уровни анализа – от отдельного AI-запроса до инфраструктуры центров обработки данных и глобального сектора. В связи с этим их механическое объединение в единый статистический индекс признано методологически некорректным. Результаты подтверждают применимость отдельных блоков предложенной модели и одновременно указывают на необходимость формирования стандартизированной панели данных для последующей статистической валидации интегрального индекса.

Ключевые слова: *искусственный интеллект, экологическая устойчивость, Green AI, зелёная экономика, экологическая эффективность, экологическая достаточность, жизненный цикл, экологическая нагрузка, экологическая полезность, центры обработки данных.*

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Введение.

Развитие искусственного интеллекта (AI) сопровождается быстрым расширением вычислительной инфраструктуры, увеличением объёмов обработки данных и ростом спроса на специализированные вычислительные ресурсы. В результате экологические последствия развития технологий искусственного интеллекта становятся самостоятельным направлением научных исследований и технологической политики.

Экологическая оценка цифровых технологий должна учитывать не только непосредственное потребление электроэнергии, но и весь жизненный цикл технологической системы. Международный стандарт ISO 14040 определяет жизненный цикл как основу системной экологической оценки и предусматривает последовательное определение цели и области исследования, инвентаризацию потоков, оценку воздействий и интерпретацию результатов [1]. Дополнительные требования к проведению оценки жизненного цикла установлены ISO 14044 [2].

Для AI такой подход приобретает особое значение вследствие специфики технологического цикла. Экологическая нагрузка возникает при производстве вычислительного оборудования, строительстве центров обработки данных, обучении моделей, аккамулировании, хранении и передаче данных, охлаждении инфраструктуры, техническом обслуживании и выводе оборудования из эксплуатации.

Эта специфика получила непосредственное отражение в новой рекомендации ITU-T L.1801, утверждённой 6 февраля 2026 г. Документ рассматривает экологическое воздействие AI на основе методологии оценки жизненного цикла и выделяет стадии от

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

создания и разработки AI-системы до эксплуатации и вывода из использования [3]. При этом рекомендация отдельно различает устойчивость самого AI и использование AI для достижения целей устойчивого развития [3].

Данное разграничение принципиально для настоящего исследования. Экологическая нагрузка AI и экологическая полезность AI представляют собой различные категории и не должны механически взаимозаменяться.

Масштаб проблемы подтверждается динамикой энергетического потребления центров обработки данных. По оценке Международного энергетического агентства, в 2024 г. мировое потребление электроэнергии центрами обработки данных составило около 415 ТВт·ч, а в базовом сценарии IEA может достичь примерно 945 ТВт·ч в 2030 г. [4].

Одновременно повышение эффективности отдельных AI-операций не обязательно приводит к снижению абсолютного потребления ресурсов. Увеличение числа пользователей, расширение спектра AI-сервисов, развитие агентных систем и увеличение вычислительной интенсивности отдельных моделей могут компенсировать эффект технологической эффективности.

В связи с этим возникает необходимость перехода от анализа отдельных экологических параметров AI к комплексной системе оценки, позволяющей учитывать одновременно ресурсную нагрузку, экологическую эффективность, полезный результат и достаточность применения AI.

Цель исследования заключается в разработке концептуальной модели оценки экологической устойчивости искусственного интеллекта в контексте «зелёной» экономики и определении условий её количественной эмпирической валидации.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

– определить структуру экологического воздействия AI;

– сформировать систему показателей оценки;

– разграничить экологическую нагрузку и экологическую полезность;

– формализовать экологическую эффективность и экологическую достаточность;

– разработать конструкцию интегрального индекса Green AI;

– провести эмпирическую апробацию модели на доступных фактических данных;

– определить ограничения существующей статистической базы.

Методы

Методологическую основу исследования составили системный подход, оценка жизненного цикла, сравнительный анализ и многокритериальная оценка.

В соответствии с методологией оценки жизненного цикла объект исследования должен быть описан через функциональную единицу и границы системы [1; 2]. Для AI

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

это означает, что экологический показатель должен быть связан с определённой функцией системы: например, выполнением текстового запроса, обработкой определённого объёма данных, генерацией изображения, выполнением задачи классификации или обеспечением работы конкретного цифрового сервиса. ITU-T L.1801 специально подчёркивает необходимость определения функциональной единицы, границ системы и распределения воздействия между различными стадиями жизненного цикла AI [3]. В настоящем исследовании AI рассматривается как социотехническая система, включающая:

сырьё → производство оборудования → вычислительную инфраструктуру → обучение → развертывание → инференс → хранение и передачу данных → обслуживание → повторное использование/переработку → вывод из эксплуатации.

На этой основе сформирована система из 25 показателей (таблица 1).

Таблица 1

Система индикаторов оценки экологической устойчивости искусственного интеллекта

Блок	Показатели
I. Энергетическая эффективность	E1 — энергоёмкость вычислений; E2 — энергия обучения и эксплуатации; E3 — доля низкоуглеродной энергии; E4 — эффективность инфраструктуры (PUE)
II. Водная эффективность	W1 — водопотребление; W2 — WUE; W3 — водный стресс территории
III. Ресурсная эффективность	R1 — материалоёмкость; R2 — доля вторичных материалов; R3 — срок службы оборудования; R4 — ресурсная эффективность инфраструктуры
IV. Циркулярность	C1 — ремонтопригодность; C2 — доля повторного использования; C3 — доля переработки; C4 — коэффициент возврата материалов
V. Климатические и экосистемные воздействия	K1 — углеродный след; K2 — углеродная интенсивность; K3 — территориальное воздействие; K4 — воздействие на биоразнообразие и экосистемы
VI. Экологическая полезность	G1 — экономия энергии; G2 — сокращение выбросов; G3 — экономия ресурсов; G4 — результативность экологического мониторинга
VII. Экологическая ответственность и прозрачность	T1 — экологическая прозрачность; T2 — экологическое представительство

Предложенная система является концептуальной системой индикаторов. Наличие показателя в системе не означает, что по нему уже существует достаточный массив сопоставимых статистических данных.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Для формализации экологической нагрузки используется агрегированный показатель:

$$L = \sum_{i=1}^{n} w_i L_i \ , \qquad \sum_{i=1}^{n} w_i = 1$$

где:

L – агрегированная экологическая нагрузка;

l_i – нормированное значение i-го показателя негативного воздействия;

w_i – вес i-го показателя.

Экологическая полезность определяется следующим образом:

$$B = \sum_{j=1}^{m} w_j b_j \ , \qquad \sum_{j=1}^{m} v_j = 1$$

где:

B – агрегированная экологическая полезность;

b_j – нормированное значение j-го показателя положительного эффекта;

v_j – его вес.

Разность между экологической полезностью и нагрузкой характеризует экологический баланс:

$$IEB_{AI} = B - L$$

где IEB_{AI} – индекс экологического баланса AI.

Для построения интегрального индекса Green AI используется следующая конструкция:

$$IGAI = 100[\beta B + (1 - \beta)(1 - L)]$$

где:

IGAI – интегральный индекс Green AI;

β – вес экологической полезности;

B – агрегированная экологическая полезность;

L – агрегированная экологическая нагрузка.

При этом значение IGAI не должно рассматриваться как абсолютная характеристика «зелёности» AI без указания функциональной единицы, границ системы, периода наблюдения, процедуры нормирования и весов.

Дополнительное методологическое значение имеет показатель экологической достаточности. Он характеризует не эффективность самой AI-системы, а необходимость её использования относительно альтернативного сценария.

Для этого может использоваться сравнительный показатель:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

$$\Delta I = I_{AI} - I_{baseline}$$

где:

I_{AI} – экологическое воздействие при использовании AI;

$I_{baseline}$ – экологическое воздействие альтернативного решения.

Если $\triangle I<0$, применение AI сопровождается снижением рассматриваемого экологического воздействия относительно базового сценария; если $\triangle I>0$, воздействие возрастает. Интерпретация возможна только при одинаковых функциональных единицах и системных границах.

Таким образом, экологическая устойчивость AI определяется не только его внутренней эффективностью, но и результатом применения относительно альтернативы.

Результаты

Разработанная модель формирует следующую причинно-следственную последовательность:

ИИ → потребление ресурсов → экологическая нагрузка

одновременно с:

ИИ → выполнение полезной функции → экологическая полезность

что далее преобразуется в:

экологический баланс → экологическая эффективность → экологическая достаточность → Green AI.

Первый результат исследования состоит в разграничении двух самостоятельных направлений анализа.

Устойчивость AI характеризует воздействие самой AI-системы на окружающую среду.

AI для устойчивого развития характеризует экологические и ресурсные эффекты применения AI в других секторах.

Именно такое разграничение используется в ITU-T L.1801 [3].

Второй результат состоит в формировании многоблочной системы показателей. В отличие от моделей, основанных преимущественно на энергопотреблении, предложенная система включает энергию, воду, материалы, циркулярность, климатические и экосистемные воздействия, экологическую полезность и институциональную прозрачность.

Третий результат заключается в формализации экологической достаточности. Снижение энергопотребления одного AI-запроса ещё не означает экологической целесообразности применения AI. Необходимо определить, какой дополнительный результат создаёт AI по сравнению с альтернативным способом выполнения той же функции.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Эмпирическая апробация

Первый массив данных относится к операционному уровню AI-инференса (вывода). Google опубликовал оценку экологического воздействия медианного текстового запроса Gemini Apps. Согласно опубликованным данным, такой запрос требует 0,24 Вт·ч энергии, сопровождается выбросами 0,03 г CO_2e и потреблением 0,26 мл воды [5].

Особое значение имеет методологическое описание Google. В отличие от оценок, учитывающих только активное потребление вычислительного оборудования, опубликованная оценка включает инфраструктурные компоненты, связанные с обслуживанием AI-запроса [5]. Это делает показатель более пригодным для операционной оценки, хотя он по-прежнему не является оценкой полного жизненного цикла AI-системы.

Таким образом, данные Google позволяют непосредственно заполнить отдельные элементы предложенной системы:

E1 – энергоёмкость инференса;

K1 – углеродный след операции;

W1 – водный след операции.

Независимое исследование Oviedo и соавторов позволяет оценить вариативность энергоёмкости AI-инференса. Для frontier-моделей с числом параметров более 200 млрд авторы получили медианное значение 0,34 Вт·ч на запрос при межквартильном диапазоне от 0,18 до 0,67 Вт·ч [6].

Эти значения нельзя рассматривать как прямую проверку показателя Gemini, поскольку исследования используют различные модели, инфраструктуру и предпосылки. Однако они подтверждают принципиальный вывод: энергоёмкость AI-запроса не является фиксированной величиной и существенно зависит от характеристик модели и режима вычислений.

Второй массив данных характеризует инфраструктурный уровень. Microsoft сообщает показатель WUE собственных центров обработки данных и раскрывает показатели циркулярности оборудования. В FY2024 компания повторно использовала или переработала 90,9 % серверов и компонентов [7].

Показатель WUE в FY2024 составил 0,30 л/кВт·ч [8]. Эти данные позволяют эмпирически характеризовать водную эффективность инфраструктуры и частично заполнить блоки II и IV предложенной модели.

Однако WUE центра обработки данных и водный след отдельного AI-запроса не должны складываться. Они описывают разные уровни системы:

0,26 мл/запрос → функциональная единица AI-сервиса;

0,30 л/кВт·ч → инфраструктурный показатель центра обработки данных.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Поэтому их непосредственное усреднение или включение в единую сумму без процедуры приведения к общей функциональной единице было бы методологически ошибочным.

Третий массив данных характеризует глобальный масштаб цифровой инфраструктуры. Международное энергетическое агентство оценивает потребление электроэнергии центрами обработки данных в 2024 г. примерно в 415 ТВт·ч [4]. В базовом сценарии IEA ожидает около 945 ТВт·ч в 2030 г. [4].

Абсолютное увеличение составляет:

$$\Delta E = 945 - 415 = 530 \text{ ТВт ч}$$

Относительное увеличение:

$$G_E = \frac{945 - 415}{415} \times 100\% \approx 127{,}7\%.$$

Однако показатель IEA относится ко всем центрам обработки данных, а не только к AI. Поэтому он не может использоваться как прямой показатель экологического воздействия искусственного интеллекта.

При этом IEA указывает, что AI является наиболее значимым фактором роста потребления электроэнергии центрами обработки данных наряду с увеличением спроса на другие цифровые услуги [9]. В базовом сценарии IEA потребление электроэнергии ускоренными серверами, в значительной степени связанными с AI, растёт примерно на 30 % в год [9].

Эти данные подтверждают важность различения эффективности единицы вычисления и масштаба совокупного использования AI.

Таблица 2

Сопоставимость эмпирических данных

Источник	Объект	Показатель	Значение	Уровень
Google	медианный текстовый запрос Gemini	энергия	0,24 Вт·ч	AI-инференс
Google	медианный текстовый запрос Gemini	CO_2e	0,03 г	AI-инференс
Google	медианный текстовый запрос Gemini	вода	0,26 мл	AI-инференс
Oviedo et al.	frontier-модели	энергия	0,34 Вт·ч, медиана	AI-инференс
Microsoft	центры обработки данных	WUE	0,30 л/кВт·ч	инфраструктура
Microsoft	серверы и компоненты	reuse/recycle	90,9 %	циркулярность
IEA	мировые центры обработки данных	электроэнергия	415 ТВт·ч	глобальный уровень
IEA	мировые центры обработки данных	прогноз	945 ТВт·ч	глобальный уровень

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Таким образом, эмпирическая апробация показывает, что современная информационная база уже позволяет измерять отдельные элементы экологического воздействия AI, однако пока не обеспечивает единого набора из 25 сопоставимых показателей для одного объекта исследования.

Это ограничение принципиально важно. ITU-T L.1801 прямо указывает, что его методология ориентирована на оценку конкретных AI-систем, а агрегирование воздействия AI на международном, национальном или региональном уровне не входит в область действия рекомендации [3].

Следовательно, получение единого статистического IGAI на основе произвольного объединения показателей Google, Microsoft и IEA было бы методологически необоснованным.

В настоящем исследовании поэтому используется более строгая схема:

25 показателей – концептуальная модель;

доступные фактические показатели – эмпирическая апробация;

IGAI – интегральная конструкция для последующей статистической валидации.

Такое решение позволяет сохранить математическую модель, не подменяя отсутствие статистических данных искусственными значениями.

Обсуждение

Полученные результаты показывают, что понятие Green AI требует более широкого определения, чем простое снижение энергопотребления вычислительной операции. В настоящем исследовании Green AI рассматривается как система, характеризующаяся четырьмя взаимосвязанными свойствами:

экологическая нагрузка – ресурсы и воздействия, необходимые для функционирования AI;

экологическая эффективность – экологические затраты на единицу полезного результата;

экологическая достаточность – наличие дополнительного результата от применения AI относительно альтернативного решения;

экологическая прозрачность – возможность проверить исходные данные и методику оценки.

Первое свойство связано непосредственно с жизненным циклом AI. Второе характеризует эффективность технологической системы. Третье позволяет оценить целесообразность применения AI. Четвёртое является условием доверия к количественным результатам.

Особое значение имеет функциональная единица. Значение 0,24 Вт·ч на запрос нельзя использовать для сравнения любых AI-систем без определения характера

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

запроса и условий его выполнения [5]. Аналогично значение 0,30 л/кВт·ч WUE характеризует инфраструктуру и не является водным следом отдельного AI-запроса [8].

Следовательно, корректное сравнение требует приведения данных к единой функциональной единице.

Вторая проблема связана с границами системы. Если в расчёт включается только GPU или TPU, но не учитываются охлаждение, распределение электроэнергии, хранение данных и другие инфраструктурные элементы, результат характеризует только отдельный компонент технологического процесса. Google непосредственно демонстрирует эту проблему, сравнивая узкую оценку активного оборудования с более полной оценкой инфраструктуры [5].

Третья проблема заключается в различии между технологической эффективностью и абсолютным экологическим эффектом.

Если энергоёмкость одного запроса снижается, но количество запросов растёт значительно быстрее, совокупное энергопотребление может увеличиваться. Именно такой эффект масштаба становится особенно значимым при расширении AI-инфраструктуры.

Четвёртая проблема связана с экологической полезностью AI. Например, AI может использоваться для прогнозирования энергопотребления, оптимизации производственных процессов, обнаружения утечек, мониторинга лесов или контроля загрязнений. Однако экологический эффект такого применения должен оцениваться относительно базового сценария.

Поэтому ключевым показателем становится не абсолютная экологическая нагрузка AI, а изменение экологического результата:

$$\Delta I = I_{AI} - I_{baseline}$$

Такая конструкция позволяет ответить на более содержательный вопрос: приводит ли внедрение AI к уменьшению совокупного экологического воздействия системы, для которой оно используется.

Пятая проблема касается масштабирования индекса. Формально IGAI может быть рассчитан для отдельного AI-продукта при наличии полного набора сопоставимых данных. Однако механическое агрегирование отдельных продуктов, компаний или национальных экономик в один глобальный индекс требует дополнительной методологии. ITU-T L.1801 специально не включает подобную агрегацию в область применения рекомендации [3].

Следовательно, дальнейшая статистическая разработка IGAI должна строиться не на искусственном заполнении отсутствующих значений, а на создании стандартизированной базы данных.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Такая база должна содержать:

– единый объект наблюдения;

– единую функциональную единицу;

– одинаковые временные интервалы;

– одинаковые границы системы;

– показатели энергии, воды, материалов и выбросов;

– показатели жизненного цикла оборудования;

– показатели циркулярности;

– данные об экологической полезности;

– информацию о качестве и неопределённости исходных данных.

После формирования такой панели возможно применение методов робастного нормирования, анализ чувствительности весов, бутстреп-оценка интервалов неопределённости и моделирование альтернативных сценариев.

Таким образом, научная ценность предложенного IGAI заключается не в присвоении AI-системе условной оценки на основе неполных данных, а в создании формализованной процедуры, которая определяет требования к данным и условия их корректного агрегирования.

Заключение

В результате исследования разработана концептуальная модель оценки экологической устойчивости искусственного интеллекта в контексте «зелёной» экономики.

В отличие от подходов, ограничивающихся оценкой энергопотребления, предложенная модель включает семь блоков и 25 показателей, характеризующих энергетическую и водную эффективность, ресурсную эффективность, циркулярность, климатические и экосистемные воздействия, экологическую полезность, а также экологическую ответственность и прозрачность.

Сформировано принципиальное разграничение между экологической нагрузкой AI и экологической полезностью его применения. На этой основе введены категории экологической эффективности и экологической достаточности.

Разработана математическая модель Green AI Index:

$$IGAI = 100[\beta B + (1-\beta)(1-L)],$$

где B характеризует экологическую полезность, L – экологическую нагрузку, а β определяет их относительную значимость.

Эмпирическая апробация показала, что открытые данные уже позволяют количественно оценивать отдельные параметры экологического воздействия AI. Так, Google оценивает медианный текстовый запрос Gemini в 0,24 Вт·ч, 0,03 г CO_2e и 0,26 мл

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

воды [5]. Microsoft раскрывает показатели водной эффективности центров обработки данных и сообщает, что в FY2024 было повторно использовано или переработано 90,9 % серверов и компонентов [7; 8]. IEA оценивает глобальное потребление электроэнергии центрами обработки данных в 415 ТВт·ч в 2024 г. с возможным увеличением до 945 ТВт·ч в 2030 г. в базовом сценарии [4; 9].

Одновременно установлено, что данные этих источников относятся к разным уровням анализа и поэтому не могут без дополнительного методологического приведения объединяться в единый статистический показатель.

Это ограничение является не недостатком математической модели, а отражением современного состояния эмпирической базы экологической оценки AI. Для получения статистически валидированного IGAI необходима панельная база данных с унифицированными функциональными единицами, границами системы, периодами наблюдения и процедурами оценки неопределённости.

Таким образом, экологическая устойчивость AI должна оцениваться через соотношение ресурсной нагрузки, экологического результата, масштаба применения и достаточности использования технологии.

Предложенная модель создаёт методологическую основу для дальнейшего формирования количественной системы мониторинга Green AI и может использоваться при разработке корпоративных, отраслевых и государственных подходов к экологической оценке цифровизации.

References

1. ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. 2nd ed. Geneva : International Organization for Standardization, 2006. 20 p.

2. ISO 14044:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. Geneva : International Organization for Standardization, 2006.

3. Recommendation ITU-T L.1801 (02/2026). Guidelines for assessing the environmental impact of artificial intelligence systems. Geneva : International Telecommunication Union, 2026.

4. International Energy Agency. Energy and AI. Paris : IEA, 2025.

5. Vahdat A., Dean J. Measuring the environmental impact of AI inference [Electronic resource] // Google Cloud Blog. 2025. 21 Aug. URL: https://cloud.google.com/blog/products/infrastructure/measuring-the-environmental-impact-of-ai-inference (accessed: 25.09.2026).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

6. Oviedo F., Kazhamiaka F., Choukse E., Kim A., Luers A., Nakagawa M., Bianchini R., Lavista Ferres J. M. Energy Use of AI Inference: Efficiency Pathways and Test-Time Compute [Electronic resource]. 2025. URL: https://arxiv.org/abs/2509.20241 (accessed: 25.09.2026).

7. Microsoft. 2025 Environmental Sustainability Report [Electronic resource]. Redmond : Microsoft, 2025. URL: https://www.microsoft.com/en-us/corporate-responsibility/sustainability/report (accessed: 25.09.2026).

8. Microsoft. Measuring energy and water efficiency for Microsoft datacenters [Electronic resource]. Redmond : Microsoft, 2026. URL: https://datacenters.microsoft.com/sustainability/efficiency/ (accessed: 25.09.2026).

9. International Energy Agency. Energy demand from AI [Electronic resource]. Paris : IEA, 2025. URL: https://www.iea.org/reports/energy-and-ai/energy-demand-from-ai (accessed: 25.09.2026).

10. Jegham N., Abdelatti M., Elmoubarki L., Hendawi A. How Hungry is AI? Benchmarking Energy, Water, and Carbon Footprint of LLM Inference [Electronic resource]. 2025. URL: https://arxiv.org/abs/2505.09598 (accessed: 25.09.2026).

11. UNEP. Artificial Intelligence (AI) end-to-end: The Environmental Impact of the Full AI Lifecycle Needs to be Comprehensively Assessed [Electronic resource]. Nairobi : United Nations Environment Programme, 2024. URL: https://www.unep.org/resources/report/artificial-intelligence-ai-end-end-environmental-impact-full-ai-lifecycle-needs-be (accessed: 25.09.2026).

12. Microsoft. Sustainable by design: Next-generation datacenters consume zero water for cooling [Electronic resource]. Redmond : Microsoft, 2024. URL: https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-cloud/blog/2024/12/09/sustainable-by-design-next-generation-datacenters-consume-zero-water-for-cooling/ (accessed: 25.09.2026).

13. ISO 14040:2006/Amd 1:2020. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework – Amendment 1. Geneva : International Organization for Standardization, 2020.

14. ISO 14031:2021. Environmental management – Environmental performance evaluation – Guidelines. Geneva : International Organization for Standardization, 2021.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

ENGINEERING APPLICATIONS

UDC 621.643.2

Tumanova E.Y., Matsegora A.V. Improvement of patch preparation technology for welding technological openings in main gas pipelines

Совершенствование технологии подготовки заплат для заварки технологических отверстий магистральных газопроводов

Tumanova Elena Yuryevna
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ufa State Petroleum Technological University
Matsegora Alexander Vladimirovich
Master's Student
Ufa State Petroleum Technological University
Туманова Елена Юрьевна
к.т.н., доцент
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»
Мацегора Александр Владимирович
магистрант
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Abstract. *The article considers technological solutions aimed at improving the quality of welding technological openings in main gas pipelines by enhancing the preparation of the patch assembly unit. It is shown that the main sources of technological deviations in manual fitting are the mismatch between the patch curvature and the pipe surface, uneven gap along the perimeter, patch misalignment, and insufficient contact of the backing ring. Based on the analysis of regulatory requirements and current repair practice, a set of design and technological solutions is proposed, including a fixture for assembling the patch with the backing ring, template-based marking and cutting of the patch from a pipe element of the corresponding size, and controlled edge preparation. It is established that the proposed solutions make it possible to stabilize the geometric parameters of the assembly unit, reduce the amount of manual fitting, and improve the conditions for subsequent welding of the technological opening.*

Keywords: *main gas pipeline, technological opening, patch, backing ring, assembly fixture, edge preparation, welding, non-destructive testing*

Аннотация. *В статье рассмотрены технологические решения, направленные на повышение качества заварки технологических отверстий магистральных газопроводов за счёт совершенствования подготовки сборочной единицы «заплата». Показано, что основными источниками технологических отклонений при существующей ручной подгонке являются несоответствие кривизны заплаты поверхности трубы, неравномерный зазор по периметру, смещение заплаты и неплотное прилегание подкладного кольца. На основе анализа нормативных требований и действующей практики ремонта предложен комплекс проектно-конструкторских решений, включающий оснастку для сборки заплаты с подкладным кольцом, шаблонную разметку и вырезку заплаты из элемента трубы соответствующего типоразмера, а также контролируемую подготовку кромки. Установлено, что применение предложенных решений позволяет стабилизировать геометрические параметры сборочной единицы, уменьшить объём ручной подгонки и улучшить условия последующей сварки технологического отверстия.*

Ключевые слова: *магистральный газопровод, технологическое отверстие, заплата, подкладное кольцо, сборочная оснастка, подготовка кромки, сварка, неразрушающий контроль.*

Рецензент: Дёма Роман Рафаэлевич — доктор технических наук, доцент кафедры «Машины и технологии обработки давлением и машиностроения» ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова»

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Введение.

Заварка технологических отверстий на магистральных газопроводах относится к ответственным ремонтным операциям, при которых качество сварного соединения определяется не только соблюдением режимов сварки, но и точностью подготовки сборочной единицы «заплата». Практика выполнения ремонтных работ показывает, что именно на стадии разметки, вырезки, подгонки и сборки заплаты формируются отклонения геометрии, влияющие на величину зазора, положение подкладного кольца и условия выполнения корневого прохода. В связи с этим повышение качества заварки технологических отверстий должно быть связано не только с совершенствованием сварочных операций, но и с разработкой технологически обеспеченных решений по подготовке заплат, обеспечивающих воспроизводимость их геометрических параметров и стабильность сборки перед сваркой.

Анализ существующей технологии

Заварка технологических отверстий на магистральных газопроводах относится к регламентированным ремонтным операциям, при которых качество сварного соединения определяется не только режимами сварки, но и точностью подготовки сборочной единицы «заплата» [1,2]. Нормативные документы устанавливают требования к форме и размерам отверстия, подготовке кромок, величине сборочного зазора, положению подкладного кольца и обязательному неразрушающему контролю после выполнения ремонта [2,3,5]. При этом для устойчивого формирования корневого слоя принципиальное значение имеют равномерность зазора по контуру, соответствие кривизны заплаты поверхности трубы и плотность прилегания подкладного кольца [2,5].

Практика ремонта показывает, что основная нестабильность качества возникает именно на стадии подготовки и сборки заплаты. При ручной подгонке характерными отклонениями являются несоответствие кривизны заплаты радиусу трубы, смещение относительно оси отверстия, неравномерный зазор по периметру и локальная неплотность прилегания подкладного кольца [4,5]. Эти отклонения изменяют условия выполнения сварки: при увеличении зазора требуется повышать тепловложение, возрастает объём наплавленного металла, ухудшается формирование корневого прохода и повышается вероятность непровара, прожога, пор и подрезов [2,4, 5].

Таким образом, существующая технология в значительной степени зависит от ручной подгонки и квалификации исполнителя, тогда как сами геометрические параметры сборочной единицы не обеспечиваются специальными технологическими средствами [4,6]. Следовательно, повышение качества заварки технологических отверстий должно быть связано не только с соблюдением режимов сварки, но прежде всего с совершенствованием подготовки заплаты, обеспечивающим

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

воспроизводимость её кривизны, контура и условий сборки с подкладным кольцом [1,2,6].

Проектно-конструкторское решение

Для устранения недостатков ручной подгонки предложены проектно-конструкторские решения, направленные на перевод подготовки заплаты в режим технологически обеспеченного изготовления. В основу подхода положены три взаимосвязанных решения: применение оснастки для сборки заплаты с подкладным кольцом, изготовление заплаты из элемента трубы соответствующего типоразмера и контролируемая подготовка кромки по всему контуру [2,4,5,6]. Такой подход позволяет управлять не только линейными размерами заготовки, но и её пространственной геометрией, определяющей условия последующей сборки и сварки.

Первым элементом технологии является оснастка для сборки узла «заплата – подкладное кольцо». Конструктивно она включает темплет из сегмента трубы и регулируемый прижимной узел. Использование сегмента трубы в качестве рабочей поверхности обеспечивает воспроизведение кривизны ремонтируемого трубопровода уже на стадии сборки, что уменьшает объём последующей ручной правки и снижает неравномерность зазора по периметру [5,6]. Конструкция оснастки приведена на рисунке 1.

Вторым элементом является способ разметки и вырезки заплаты из элемента трубы того же типоразмера, что и ремонтируемый участок. Это позволяет обеспечить соответствие кривизны не за счёт дополнительной подгонки, а за счёт правильного выбора исходной заготовки. Разметка выполняется по шаблону с базированием относительно осей заготовки, что исключает случайное смещение овального контура и повышает точность геометрии заплаты [4,5].



Рисунок 1 – Оснастка для сборки заплаты с подкладным кольцом

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Третьим элементом является способ подготовки кромки заплаты с обеспечением постоянства угла скоса и притупления по всему контуру. После вырезки выполняется предварительное формирование кромки, затем — окончательная механическая доводка на темплете. Это позволяет стабилизировать геометрию разделки и уменьшить влияние локальных отклонений на условия выполнения корневого прохода [2,5,7]. Схема разметки заплаты на элементе трубы может быть приведена на рисунке 2.

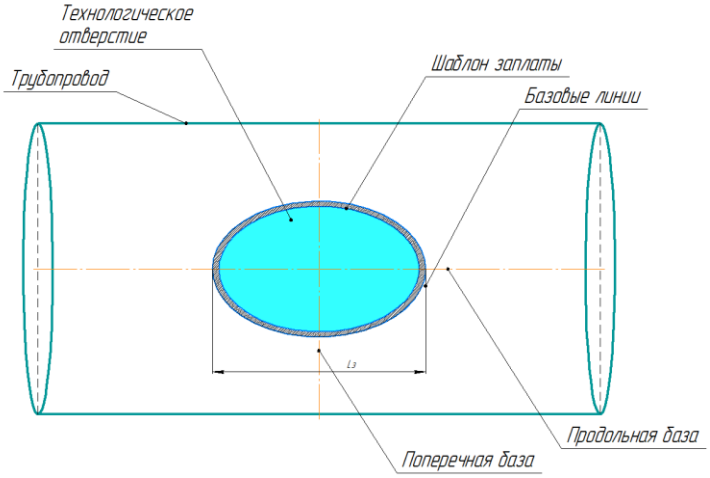


Рисунок 2 – Схема разметки и вырезки заплаты из элемента трубы

Таким образом, предложенные решения образуют единую технологическую схему, в которой оснастка обеспечивает стабильную сборку, вырезка из элемента трубы — соответствие кривизны, а контролируемая подготовка кромки — воспроизводимость разделки под сварку. Это снижает зависимость качества от ручной подгонки и создаёт более устойчивые условия для последующей заварки технологического отверстия [4,5,6].

Объём разделки кромки заплаты является одним из параметров, определяющих условия последующей сварки, поскольку с его увеличением возрастает объём наплавляемого металла, тепловложение и ширина зоны термического влияния. Для количественной оценки влияния геометрии кромки на объём разделки использовалась зависимость

$$V = \frac{(\delta - p)2tg\beta}{2};$$

где V — объём разделки на 1 м длины кромки, см³/м;

δ — толщина стенки заплаты, мм;

p — притупление, мм;

β — угол скоса, град.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Из приведённой зависимости следует, что при увеличении угла скоса и толщины стенки объём разделки возрастает, а при увеличении притупления уменьшается. Результаты расчёта зависимости объёма разделки от угла скоса при различных толщинах стенки представлены на рисунке 3.

Результаты расчётной оценки влияния параметров скоса на объём разделки приведены на рисунках 3и 4.

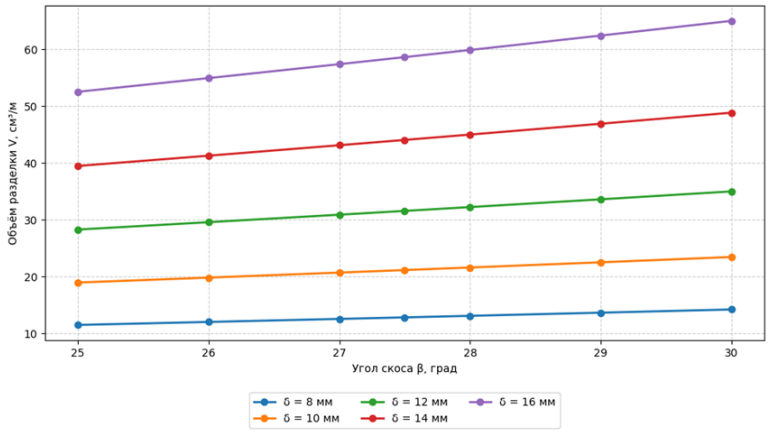


Рисунок 3 – Зависимость объёма разделки от угла скоса при различных толщинах стенки

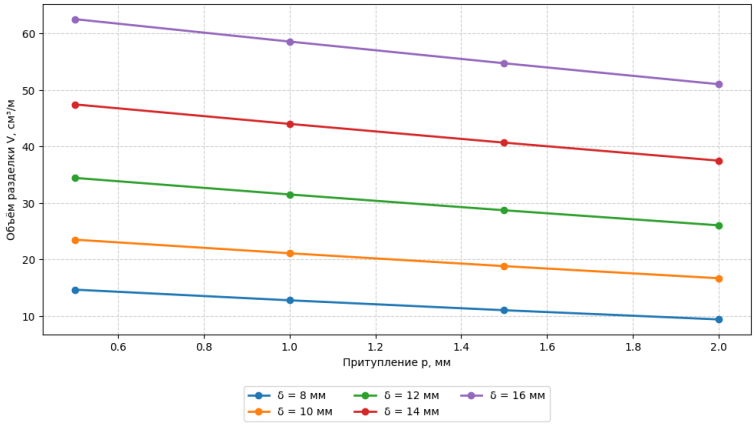


Рисунок 4 – Зависимость объёма разделки от величины притупления при различных толщинах стенки

Применение предложенных решений направлено на уменьшение разброса геометрических параметров сборочной единицы «заплата» и, как следствие, на повышение устойчивости последующей заварки технологического отверстия. В отличие от ручной подгонки, при которой фактический зазор и положение подкладного кольца

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

формируются в значительной степени случайно, использование оснастки, шаблонной разметки и контролируемой подготовки кромки позволяет перевести эти параметры в управляемую область [2,4,5]. В практическом отношении это означает снижение вероятности отклонений, непосредственно влияющих на выполнение корневого прохода.

Наиболее важным результатом является уменьшение неравномерности зазора по периметру заплаты. При стабильной геометрии сборки сварка выполняется в более однородных условиях, без необходимости постоянной корректировки режима в различных участках контура. Это снижает вероятность непровара, прожога, порообразования и дефектов формы шва, которые в действующей технологии часто связаны именно с локальными отклонениями геометрии [2,5]. Кроме того, плотное прилегание подкладного кольца уменьшает выход газа в зоне ремонта, улучшает условия наблюдения за сварочной ванной и повышает устойчивость формирования корневого слоя.

Дополнительный технологический эффект связан со снижением трудоёмкости подготовки. При использовании оснастки и шаблонной вырезки уменьшается число повторных примерок и объём ручной правки, поскольку геометрия заплаты формируется заранее, а не уточняется многократной подгонкой по месту [4,5,6]. Это особенно важно для ремонта магистральных газопроводов, где сокращение времени подготовительных операций способствует не только повышению производительности, но и улучшению организации работ.

Таким образом, предложенные решения обеспечивают технологический эффект по трём основным направлениям: стабилизация геометрии сборочной единицы, улучшение условий выполнения сварки и сокращение трудоёмкости подготовки. В совокупности это создаёт предпосылки для повышения качества заварки технологических отверстий и уменьшения зависимости результата от ручной подгонки и квалификации исполнителя.

Вывод.

Проведённый анализ показал, что качество заварки технологических отверстий магистральных газопроводов в значительной степени определяется точностью подготовки сборочной единицы «заплата». Установлено, что при ручной подгонке основными источниками технологических отклонений являются несоответствие кривизны заплаты поверхности трубы, неравномерный зазор по периметру, смещение заплаты и неплотное прилегание подкладного кольца, что ухудшает условия выполнения корневого прохода и повышает вероятность дефектов сварного соединения. Предложенные проектно-конструкторские решения, включающие

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

применение оснастки для сборки заплаты с подкладным кольцом, шаблонную разметку и вырезку заплаты из элемента трубы соответствующего типоразмера, а также контролируемую подготовку кромки, позволяют перевести изготовление заплаты из режима ручной подгонки в режим технологически обеспеченной подготовки. Практический эффект заключается в стабилизации геометрических параметров сборочной единицы, уменьшении числа повторных примерок и улучшении условий последующей сварки, что создаёт предпосылки для повышения качества ремонта технологических отверстий магистральных газопроводов.

References

1. ГОСТ 32569–2013. Трубопроводы магистральные. Общие требования к ремонтным работам.
2. СТО Газпром 15-1.2-003–2023. Сварка и неразрушающий контроль сварных соединений. Технологии ремонта дефектов труб и сварных соединений трубопроводов.
3. СТО Газпром 15-1.3-004–2023. Сварка и неразрушающий контроль сварных соединений. Неразрушающий контроль сварных соединений трубопроводов.
4. Еремин В. А. Современные технологии ремонта магистральных трубопроводов. М.: Инфра-Инжиниринг, 2013. 248 с.
5. СТП СФШИ.01.27–2012. Сварка и контроль качества сварных соединений при ремонте действующих газопроводов методом вварки заплат. Минск: ОАО «Газпром трансгаз Беларусь», 2012. 87 с.
6. Хайдарова А. А. Сборочно-сварочные приспособления. Этапы конструирования: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 132 с.
7. ГОСТ Р ИСО 9013–2022. Резка термическая. Классификация резов. Геометрические характеристики изделий и допуски по качеству.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 911.53

Piksasova L.N. Man-made transformation of Crimean landscapes in mining areas and prospective use of quarry territories (using the example of a quarry in the village of Skalistoe Bakhchisarai district)

Техногенное преобразование ландшафтов Крыма в районах добычи полезных ископаемых и перспективное использование территорий карьеров (на примере карьера в с. Скалистое Бахчисарайского района)

Piksasova Liliya Nikolaevna
Geography Teacher, Center for Secondary Vocational Education,
Fevzi Yakubov KIPU
Пиксасова Лилия Николаевна
Преподаватель географии, ЦСПО КИПУ имени Февзи Якубова

Abstract. *This article analyzes the anthropogenic impact of mining on the natural landscape and develops a regeneration system for the development of recreational areas. Using the example of the quarry in the village of Skalistoe in the Bakhchisaray District of the Republic of Crimea, it demonstrates how analyzing the state of the altered landscape allows for modeling its future use, taking into account the environmental situation and sustainable nature management. Conclusions drawn from the material studied allowed for the formulation of universal quarry management methods that combine the economic development of mineral resources with a system of measures for the conservation, restoration, and rehabilitation of landscapes.*

Keywords*: natural landscape, anthropogenic transformation, quarry, mineral resource base, landscape restoration.*

Аннотация. *Статья посвящена анализу антропогенного влияния на природный ландшафт в сфере добычи полезных ископаемых и разработке системы его регенерации для развития рекреационных зон. На примере карьёра села Скалистое Бахчисарайского района Республики Крым показано, каким образом анализ состояния подвергнувшегося изменению ландшафта позволяет моделировать пути его дальнейшего использования с учетом экологической ситуации и рационального природопользования. Выводы, сделанные на основе изученного материала, позволили сформулировать универсальные способы использования карьеров, в которых сочетаются хозяйственное освоение минерально-сырьевой базы и система мер по сохранению, рекультивации и восстановлению ландшафтов.*

Ключевые слова: *природный ландшафт, техногенное преобразование, карьер, минерально-сырьевая база, рекультивация ландшафтов.*

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

В предлагаемом исследовании предпринята попытка проанализировать, как деятельность человека в определенной местности ведения хозяйственной деятельности, в особенности в сфере добычи полезных ископаемых, изменяет природный ландшафт. Данные исследования важны для оценки характера воздействия

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

на окружающую среду и поиска способов её сохранения, а также её дальнейшего рационального использования, что составляет актуальность проведенной работы.

Цель работы – проанализировать характер и масштабы техногенного преобразования ландшафтов Крыма в местах разработки карьеров и выявить возможности по дальнейшему рациональному использованию территорий добычи полезных ископаемых на примере карьера в с. Скалистое Бахчисарайского района Республики Крым.

По данным Министерства экологии и природных ресурсов Республики Крым, на территории полуострова на данный момент действуют 45 карьеров, из них 16 – карьеры по добыче строительных камней, 17 – по добыче песков и 12 – по добыче песчано-гравийной смеси [6].

Добыча сырья нередко сопровождается масштабными нарушениями естественных ландшафтов и геохимической ситуации в районах их разработки. К тому же открытая добыча полезных ископаемых вызывает коренную перестройку природных ландшафтов, уничтожая их литогенную основу, рельеф, почвенный покров и растительность, что значительно влияет на экологическую ситуацию [2; 5 и др.].

По предварительным оценкам, такие изменения считаются разрушительными для природы, но в ряде случаев именно они становятся основой для создания новых рекреационных территорий – мест отдыха, туризма и спорта.

Ярким примером техногенного преобразования ландшафтов являются окрестности села Скалистое Бахчисарайского района Республики Крым, где с начала 1950-х и до начала 1990-х годов добывали мшанковый известняк.

Село Скалистое расположено на северо-востоке Бахчисарайского района, в долине реки Бодрак, на правом склоне долины, в месте размыва рекой Внутренней гряды Крымских гор. Верхнюю скалистую часть гряды на западе образуют верхнемеловые мшанковые известняки (до долины реки Альма), в основном эоценовые нуммулитовые известняки на всем ее протяжении. Наличие на этой территории прочных мшанковых известняков, пригодных для использования в строительстве, обусловило разработку карьеров на месторождениях строительных камней для получения стеновых блоков [4].

В начале 1950-х годов на южной окраине села Скалистое начали добывать ценный строительный материал – мшанковый известняк, более известный под местным названием «альминский», «инкерманский», или «бодракский» камень.

Ниже приведена составленная нами на основании проанализированных источников сравнительная таблица естественного состояния основных компонентов ландшафта до разработки карьера (на основе набора тематических карт Атласа

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Автономной Республики Крым [1]) и после него (на основе непосредственного обследования автором статьи карьера и прилегающих к нему территорий).

Таблица 1

Состояние основных компонентов ландшафта до разработки карьера и после

Компоненты ландшафта	Состояние компонентов ландшафта до разработки	Состояние компонентов ландшафта после разработки
Геологическое строение (литогенная основа)	Покровные четвертичные отложения разного возраста и генезиса. Ниже – отложения известняков и мергелей среднего эоцена бахчисарайского и симферопольского ярусов и мшанковых известняков верхнего мела.	Практически повсеместное распространение толщи техногенных грунтов – вскрышных отвалов, состоящих из дресвы, щебня и глыб известняка с супесчано-суглинистым заполнителем, либо раздробленные пылевато-глинистые грунты с дресвой и щебнем, которые перекрывают почвы, четвертичные отложения и коренные породы
Геоморфология и рельеф	Естественный рельеф: пологий северный склон Внутренней гряды Крымских гор, правый борт долины реки Бодрак	Прямоугольная выемка грунта (непосредственно карьер), ступенчатое понижение рельефа, насыпи вскрышной породы по бортам карьера, искусственные уступы, отвалы вскрышной породы на склонах, подрезка и планировка естественного рельефа для сети технологических дорог, эрозионные борозды и промоины на склонах карьера
Гидрология и гидрогеология	Естественный сток с северного склона гряды и со склона долины в реку Бодрак	Нарушение естественного стока. Перехват стока по северному склону гряды не в реку Бодрак, а непосредственно в карьер. Выход подземных вод на поверхность по причине глубокой разработки карьера и, как следствие, обводнение карьера и остановка его разработки
Растительность	Разнотравно-типчаково-ковыльные степи и пушисто-дубовые леса предгорий Крымских гор	На месте разработки карьера естественные растительные сообщества практически полностью уничтожены. Самозарастание склонов карьера идёт медленно и сопровождается появлением пионерных видов и сорной флоры. На прилегающих к карьеру территориях отмечается появление участков с пылевыми отложениями на листьях растений
Почвы	Дерново-карбонатные почвы	Почвенный покров с поверхности либо перекрыт насыпными грунтами, либо перемешан с ними, либо полностью срезан

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Опираясь на вышеизложенные данные, можно сделать вывод, что природный ландшафт на месте карьера полностью преобразован в техногенный ландшафт, трансформации подверглись все его основные компоненты, кроме климата.

Техногенное преобразование ландшафта показывает, что открытая добыча полезных ископаемых приводит к глубокой трансформации природной среды. Меняется рельеф, нарушается почвенный покров, деградирует растительность. Это влечет за собой комплекс экологических последствий: усиление эрозии, изменение водного режима, ухудшение качества воздуха и снижение биоразнообразия и т.д. [2].

Карьер в селе Скалистое перестал функционировать с начала 90-х годов XX века, т.е. около 30 лет назад, после внезапного заполнения дна карьера подземными водами. Однако за это время ни один из перечисленных основных компонентов не восстановился, и ландшафт остается сугубо техногенным. Следует особо отметить, что даже при крайней степени изменения горнопромышленных ландшафтов в них не происходит полного уничтожения природной основы [2], в частности, сохраняются зональные климатические характеристики, сохраняются геолого-структурные особенности литогенной основы ландшафтов, тенденции развития различных экзогенных процессов, которые могут ослабевать или, наоборот, усиливаться в новых условиях трансформированного рельефа [7, с. 425–426].

Изменение карьера в селе Скалистое показывает, что переход от техногенного состояния ландшафта к природно-техногенному занимает значительное время. Для быстрого восстановления природного баланса, обеспечения продуктивности и хозяйственной ценности нарушенных земель, а также для улучшения условий окружающей среды необходим комплекс мероприятий по рекультивации карьера, который должен быть предусмотрен на этапе разработки проекта по добыче сырья.

Как отмечалось ранее, дно карьера обводнено вследствие вскрытия горизонта подземных вод. По сути карьер превратился в озеро и стал местной достопримечательностью. Со временем на берегу карьера стала образовываться пляжная инфраструктура: организованы кафе, беседки, навесы, раздевалки, игровые зоны и т.п. Однако торгово-рекреационная деятельность на территории карьера носит неорганизованный, стихийный по отношению к проблеме хозяйственного развития объекта характер.

Внедрение рационального подхода к развитию территории карьера могло бы сочетать в себе мероприятия по рекультивации, продуманному и безопасному обустройству рекреационной зоны, а именно:

- рекультивацию и обустройство склонов (террасирование, отсыпка почвой, высадка растительности, которая хорошо укрепляет склоны);

- удаление вскрышных отвалов на периферии карьера и дальнейшее её

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

озеленение;

- исследование поверхностных вод из карьера на химико-бактериологический состав;

- удаление со дна водоема крупных кусков пород, металлического лома и других посторонних предметов;

- выполаживание бортов карьера до устойчивого состояния и последующее его закрепление от разрушающего действия волн;

- организацию пляжных участков шириной до 30 м, остальная прибрежная полоса подлежит озеленению;

- в местах распространения глинистых грунтов участки пляжей должны быть подсыпаны песчаными грунтами;

- устройство подъездов, площадок, водозаборных и водосборных сооружений, организация поверхностного стока, проведение противоэрозионных и противооползневых мероприятий [3].

Обратимся к выводам по проведенному исследованию:

1. Техногенные преобразования ландшафтов, при сочетании определенных факторов, могут стать основой для развития рекреационных зон, что является одним из приоритетных направлений социально-экономического развития Республики Крым.

2. К мероприятиям комплексного подхода к решению вопроса о создании безопасной и удобной инфраструктуры для рекреации можно отнести следующее: проведение тщательной оценки состояния территории и перспективных возможностей ее использования, выполнение необходимых природоохранных мероприятий по рекультивации и восстановлению, планирование мониторинга изменений основных параметров объекта и некоторые др.

3. Проанализированный пример состояния карьера в селе Скалистое Бахчисарайского района иллюстрирует необходимость сочетать хозяйственное освоение минерально-сырьевой базы со своевременно продуманной системой мер по сохранению, рекультивации и восстановлению ландшафтов, что позволит избежать глубокой техногенной трансформации и создать условия для дальнейшего безопасного и эффективного использования территории карьеров.

References

1. Атлас. Автономная Республика Крым. Таврический национальный университет им. В. И. Вернадского. – Киев–Симферополь : Ин-т географии НАН Украины; ТНУ им. В. И. Вернадского; НИЦ «Технологии устойчивого развития» при ТНУ; ЗАО «Институт передовых технологий», 2003. – 32 с.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

2. Багров, Н. В., Боков, В. А. Экология Крыма / Н. В. Багров, В. А. Боков. – Симферополь : Крымучпедгиз, 2012. – 360 с.

3. Васильченко, А. В. Рекультивация нарушенных земель: учебное пособие: в 2-х частях / А. В. Васильченко; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2017. – Ч. 1. – 230 с.

4. Подгородецкий, П. Д. Крым: Природа. Справочное издание / П. Д. Подгородецкий. – Симферополь : Таврия, 1988. – 130 с.

5. Попов, В. Ф., Толстихин, О. Н. Общая экология / В. Ф. Попов, О. Н. Толстихин. – Якутск : Изд-во Якутск. гос. ун-та, 2000. – 380 с.

6. Схема расположения по добыче нерудных полезных ископаемых на территории Республики Крым // Сайт Министерства экологии и природных ресурсов Республики Крым. – URL: https://meco.rk.gov.ru/structure/96c21b04-0602-48b8-b19d-9fe6b447bf82 (дата обращения: 22.06.2026).

7. Фурманова, Т. Н., Петина, М. А., Петин, А. Н., Белоусова, Л. И. Техногенная трансформация ландшафтов в зоне влияния активно разрабатываемых месторождений полезных ископаемых региона КМА // Успехи современного естествознания, №11-2, 2016. – С. 422–426.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

INDUSTRIAL RESEARCH AND PRODUCTION

UDC 657.633:622.34

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Dolbin I.D. A risk-based approach to planning the internal audit of mine production processes

Риск-ориентированный подход к планированию внутреннего аудита производственных процессов рудника

Arno Veronika Vladimirovna
Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan
Kolesnichenko Eva Pavlovna
Undergraduate Student, State and Municipal Audit Programme,
Moscow State University, Moscow
Garifulina Irina Yurievna,
Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan
Dolbin Ivan Dmitrievich,
Undergraduate Student
of Polytechnic Institute North-Eastern State University, Magadan
Арно Вероника Владимировна,
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО
Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Колесниченко Ева Павловна,
Студентка 4 курса направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит»
ВШГА МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва
Гарифулина Ирина Юрьевна,
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО
Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Долбин Иван Дмитриевич,
Студент 3 курса
Политехнический институт
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет

Abstract. The aim of the study is to develop a model of risk-based planning for the internal audit of mine production processes and to quantitatively compare its effectiveness with a uniform allocation of audit resources. Methods of residual risk assessment, ranking of processes by audit priority, allocation of the labour fund in proportion to risk and calculation of an integral plan effectiveness indicator were applied. Eight calculation relationships are proposed and tested on a model map of ten production processes with an annual internal audit fund of 1200 man-hours. It is established that the total gross risk amounts to 449.5 million roubles and the residual risk to 211.0 million roubles, meaning the existing control system reduces risk by 53.1 %; the top four processes by priority concentrate 78.3 % of the residual risk. The plan effectiveness indicator under risk-based allocation equals 0.2103 against 0.1000 under uniform allocation, an increase of 110.3 % with no additional labour input. The highest priority is assigned to industrial safety and occupational health (420 man-hours) and mine survey volume accounting (245 man-hours).

Keywords: internal audit, risk-based approach, mine production processes, residual risk, audit priority, audit plan, audit effectiveness, mine survey accounting, industrial safety.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Аннотация. Цель работы – разработать модель риск-ориентированного планирования внутреннего аудита производственных процессов рудника и количественно сопоставить её результативность с равномерным распределением аудиторских ресурсов. Использованы методы оценки остаточного риска, ранжирования процессов по приоритету проверки, распределения трудового фонда пропорционально риску и расчёта интегрального показателя результативности плана. Предложены восемь расчётных зависимостей, апробированных на модельной карте из десяти производственных процессов при годовом фонде внутреннего аудита 1200 чел.-ч. Установлено, что суммарный валовой риск составляет 449,5 млн руб., остаточный – 211,0 млн руб., то есть действующая система контроля снижает риск на 53,1 %; первые четыре процесса по приоритету концентрируют 78,3 % остаточного риска. Показатель результативности плана при риск-ориентированном распределении равен 0,2103 против 0,1000 при равномерном, прирост составляет 110,3 % без увеличения трудозатрат. Наивысший приоритет получают промышленная безопасность и охрана труда (420 чел.-ч) и маркшейдерский учёт объёмов (245 чел.-ч).

Ключевые слова: внутренний аудит, риск-ориентированный подход, производственные процессы рудника, остаточный риск, приоритет проверки, план аудита, результативность аудита, маркшейдерский учёт, промышленная безопасность.

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Введение

Внутренний аудит горнодобывающего предприятия работает в условиях структурного дефицита ресурса: число процессов, формально подлежащих проверке, всегда превышает возможности службы. При этом процессы принципиально неравноценны по последствиям сбоя. Отказ узла энергоснабжения вспомогательного участка и ошибка в маркшейдерском учёте объёмов горной массы требуют сопоставимых трудозатрат на проверку, но различаются по потенциальному ущербу на порядок. Равномерное распределение аудиторских часов по процессам, характерное для планов «по перечню подразделений», игнорирует это различие и потому заведомо неоптимально.

Риск-ориентированный подход предлагает альтернативу: аудиторский ресурс концентрируется на областях наибольшего риска. К базовым элементам такого подхода относят планирование аудита на основе оценки рисков, оценку уровня риска, анализ уязвимости системы контроля и контроль устранения нарушений [1]. Методология риск-ориентированного аудита строится на идентификации, оценке и приоритизации рисков существенного искажения с последующей концентрацией ресурсов на зонах наибольшего риска [2]. Однако применительно к горному производству эти общие положения требуют содержательного наполнения: набор процессов, характер ущерба и структура контрольных процедур на руднике специфичны и не сводятся к финансовым бизнес-процессам.

Актуальность задачи подкрепляется надзорной статистикой. По итогам 2025 года на объектах горной промышленности зафиксировано 29 случаев смертельного травматизма, что на 22 случая меньше уровня 2024 года; снижение связывается с

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

повышением количества и качества контрольных действий, а также с увеличением числа профилактических мероприятий [3]. Ростехнадзор при этом закрепляет риск-ориентированную логику в собственной надзорной практике, утверждая программы профилактики рисков причинения вреда охраняемым законом ценностям [4]. Отраслевая отчётность фиксирует, что на отдельных поднадзорных территориях за 9 месяцев 2025 года аварий и несчастных случаев со смертельным исходом не зарегистрировано [8], что подтверждает неоднородность распределения риска между объектами.

Последнее обстоятельство принципиально: результативность контроля зависит не от его объёма, а от адресности. Цель работы — разработать модель риск-ориентированного планирования внутреннего аудита производственных процессов рудника, обеспечивающую распределение ограниченного фонда трудозатрат пропорционально остаточному риску, и количественно оценить выигрыш относительно равномерного плана.

Материалы и методы

Карта процессов и параметры оценки

Объектом планирования принята типовая карта производственных процессов рудника, включающая десять процессов. Для каждого процесса эксперты оценивают четыре параметра: вероятность реализации риска в течение года, потенциальный ущерб, эффективность действующих контрольных процедур и множитель значимости, отражающий надзорные и репутационные последствия. Дополнительно учитывается давность предыдущей проверки. Исходные оценки приведены в таблице 1.

Таблица 1

Экспертные оценки параметров риска производственных процессов

Процесс	Pi, доли ед.	Ui, млн руб.	Di, доли ед.	Ki	τi, лет
Промышленная безопасность и охрана труда	0,55	260	0,40	1,0	1
Маркшейдерский учёт объёмов	0,45	140	0,35	1,0	3
ТОиР горной техники	0,50	95	0,45	0,8	3
Закупки и склады МТР	0,40	110	0,50	0,8	2
Учёт и хранение драгметалла	0,20	320	0,75	1,0	1
Буровзрывные работы	0,35	85	0,55	0,9	2
Экология и водопользование	0,30	70	0,55	0,9	4
Транспорт и отвалообразование	0,30	60	0,60	0,7	1
Дробление и рудоподготовка	0,25	45	0,65	0,7	2
Энергоснабжение	0,20	40	0,70	0,6	3

Примечание: Di — интегральная оценка эффективности действующих контрольных процедур; τi — период, прошедший с последней проверки процесса.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Расчётные зависимости

Валовой риск процесса определяется произведением вероятности реализации и потенциального ущерба

$$R_i = P_i \cdot U_i \quad (1)$$

где Pi — вероятность реализации риска в течение года, доли ед.; Ui — потенциальный ущерб, млн руб.

Остаточный риск учитывает результативность действующих контрольных процедур и значимость процесса

$$R_{\text{ост},i} = R_i(1 - D_i) \cdot K_i \quad (2)$$

где Di — оценка эффективности контрольных процедур, доли ед.; Ki — множитель значимости процесса, учитывающий надзорные и репутационные последствия.

Давность предыдущей проверки повышает неопределённость состояния процесса, что учитывается временным коэффициентом

$$k_{\text{т},i} = 1 + \alpha \cdot \tau_i \quad (3)$$

где τi — число лет с момента последней проверки; α = 0,12 год$^{-1}$ — коэффициент нарастания неопределённости, принятый по результатам экспертного опроса.

Приоритет включения процесса в план аудита и его нормированная доля составляют

$$П_i = R_{\text{ост},i} \cdot k_{\text{т},i},\ s_i = \frac{П_i}{\sum_{j=1}^{m} П_j} \quad (4)$$

где m — общее число процессов в карте.

Трудозатраты распределяются пропорционально приоритету с соблюдением минимального объёма проверки, обеспечивающего базовое покрытие каждого процесса

$$H_i = \max(s_i \cdot F,\ H_{min}) \cdot \frac{F}{\sum_{j=1}^{m} \max(s_j \cdot F,\ H_{min})} \quad (5)$$

где F — годовой фонд трудозатрат службы внутреннего аудита, чел.-ч; Hmin — минимальный объём проверки одного процесса, чел.-ч.

Накопленное покрытие остаточного риска первыми k процессами по приоритету рассчитывается как

$$C_k = \frac{\sum_{i=1}^{k} R_{\text{ост},i}}{\sum_{i=1}^{m} R_{\text{ост},i}} \quad (6)$$

Результативность плана определяется как нормированная взвешенная сумма произведений остаточного риска на выделенные трудозатраты

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{m} R_{\text{ост},i} \cdot H_i}{F \cdot \sum_{i=1}^{m} R_{\text{ост},i}} \quad (7)$$

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Выигрыш риск-ориентированного плана относительно равномерного распределения оценивается отношением

$$G = \left(\frac{E_{\text{риск}}}{E_{\text{равн}}} - 1\right) \cdot 100 \quad (8)$$

где Eравн — результативность плана при равномерном распределении фонда, при котором Hi = F/m. Расчёт выполнен при F = 1200 чел.-ч, Hmin = 40 чел.-ч, m = 10 и α = 0,12 год$^{-1}$.

Результаты

Расчёт валового и остаточного риска, приоритетов и распределения трудозатрат приведён в таблице 2. Суммарный валовой риск по карте процессов составил 449,5 млн руб., остаточный — 211,0 млн руб., то есть действующая система контроля снижает риск на 53,1 %.

Таблица 2

Риск-ориентированное распределение фонда внутреннего аудита

Ранг	Процесс	Ri, млн руб.	Rост,i, млн руб.	kт,i	Пi	si	Hi, чел.-ч
1	Промышленная безопасность и охрана труда	143,00	85,80	1,12	96,10	0,372	420
2	Маркшейдерский учёт объёмов	63,00	40,95	1,36	55,69	0,215	245
3	ТОиР горной техники	47,50	20,90	1,36	28,42	0,110	125
4	Закупки и склады МТР	44,00	17,60	1,24	21,82	0,084	96
5	Учёт и хранение драгметалла	64,00	16,00	1,12	17,92	0,069	79
6	Буровзрывные работы	29,75	12,05	1,24	14,94	0,058	66
7	Экология и водопользование	21,00	8,50	1,48	12,59	0,049	55
8	Транспорт и отвалообразование	18,00	5,04	1,12	5,64	0,022	38
9	Дробление и рудоподготовка	11,25	2,76	1,24	3,42	0,013	38
10	Энергоснабжение	8,00	1,44	1,36	1,96	0,008	38
—	Итого	449,50	211,00	—	258,50	1,000	1200

Ранжирование даёт результат, который не воспроизводится интуитивным планированием. Процесс «Учёт и хранение драгметалла» имеет наибольший потенциальный ущерб среди всех процессов — 320 млн руб., но благодаря высокой эффективности действующего контроля (Di = 0,75) его остаточный риск составляет лишь 16,00 млн руб., что помещает процесс на пятое место по приоритету с 79 чел.-ч. Напротив, промышленная безопасность и охрана труда при вдвое меньшем потенциальном ущербе (260 млн руб.) и умеренной эффективности контроля (Di = 0,40) формируют остаточный риск 85,80 млн руб. — максимум по карте и 40,7 % совокупного

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

остаточного риска. Планирование по валовому ущербу привело бы к прямо противоположному распределению ресурса.

Второе место занимает маркшейдерский учёт объёмов с остаточным риском 40,95 млн руб. и 245 чел.-ч. Причина высокого приоритета — сочетание умеренного ущерба (140 млн руб.) с низкой эффективностью контроля (Di = 0,35), максимальным множителем значимости и трёхлетней давностью последней проверки, что даёт временной коэффициент 1,36. Совместно первые два процесса получают 665 чел.-ч, или 55,4 % годового фонда, при том что на них приходится 60,1 % совокупного остаточного риска.

Сопоставление результативности риск-ориентированного и равномерного планов приведено в таблице 3.

Таблица 3

Сравнение риск-ориентированного и равномерного планов аудита

Показатель	Риск-ориентированный план	Равномерный план
Трудозатраты на процесс максимального риска, чел.-ч	420	120
Трудозатраты на процесс минимального риска, чел.-ч	38	120
Покрытие остаточного риска первыми двумя процессами C2, доли ед.	0,601	0,601
Покрытие остаточного риска первыми четырьмя процессами C4, доли ед.	0,783	0,783
Доля фонда, направленная на первые четыре процесса, %	73,8	40,0
Показатель результативности плана E, доли ед.	0,2103	0,1000
Выигрыш G, %	110,3	—

Примечание: показатели C2 и C4 характеризуют структуру остаточного риска и не зависят от способа распределения фонда; различие планов проявляется в доле фонда, направляемой на эти процессы.

Ключевой количественный результат состоит в том, что при неизменном фонде 1200 чел.-ч показатель результативности плана возрастает с 0,1000 до 0,2103 доли ед., то есть на 110,3 %. Экономическая природа выигрыша проста: равномерный план направляет 40,0 % фонда на четыре процесса, концентрирующие 78,3 % остаточного риска, тогда как риск-ориентированный — 73,8 %. При этом ограничение Hmin = 40 чел.-ч сохраняет минимальное покрытие процессов с низким риском, не допуская образования непроверяемых зон: три процесса с наименьшим приоритетом получают по 38 чел.-ч, что достаточно для выполнения базовых контрольных процедур.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Обсуждение

Полученные результаты показывают, что основным носителем информации при планировании является не ущерб и не вероятность по отдельности, а остаточный риск. Именно он объединяет характеристику угрозы с состоянием действующего контроля, и именно его игнорирование порождает типовую ошибку планирования — концентрацию проверок на процессах, которые уже хорошо контролируются. В рассмотренном примере расхождение между рангом по валовому ущербу и рангом по остаточному риску для процесса учёта драгметалла составило четыре позиции.

Высокий приоритет маркшейдерского учёта объёмов согласуется с нормативными требованиями к этому процессу. Пункт 15 ФНП, утверждённых приказом Ростехнадзора от 08.12.2020 № 505, обязывает организации, эксплуатирующие объекты горных работ, осуществлять маркшейдерское обеспечение на основании лицензии либо по договору со специализированной организацией [5], а пункт 568 требует выполнения работ в соответствии с проектом производства маркшейдерских работ [5]. Нарушение этих требований одновременно создаёт надзорный, учётный и налоговый риск, что и отражено в модели максимальным множителем значимости Ki = 1,0.

Приоритет промышленной безопасности подтверждается статистикой аварийности. Снижение смертельного травматизма на объектах горной промышленности в 2025 году до 29 случаев связывается непосредственно с ростом количества и качества контрольных и профилактических мероприятий [3, 8-9]. Это эмпирическое свидетельство обратной связи между интенсивностью контроля и уровнем реализованного риска, то есть подтверждение того, что перераспределение аудиторского ресурса в пользу процессов с высоким остаточным риском даёт измеримый эффект, а не только формальное улучшение расчётного показателя результативности.

Временной коэффициент по формуле (3) выполняет в модели роль механизма ротации. Без него процессы с эффективным контролем выпадали бы из плана на неопределённый срок, а фактическое состояние их контрольных процедур постепенно расходилось бы с экспертной оценкой Di, полученной при предыдущей проверке. При α = 0,12 год$^{-1}$ процесс, не проверявшийся четыре года, получает надбавку к приоритету 48 %, что для процессов среднего уровня риска оказывается достаточным для попадания в план. Так, экология и водопользование при остаточном риске 8,51 млн руб. поднимается на седьмое место с 55 чел.-ч именно за счёт четырёхлетней давности проверки.

Ограничения модели связаны с экспертным характером входных оценок. Значения Pi, Ui, Di и Ki получены методом экспертного опроса и наследуют его

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

субъективность, причём наиболее чувствительным параметром является Di: изменение оценки эффективности контроля на 0,1 доли ед. меняет остаточный риск процесса на 15–20 % и способно сдвинуть его в ранжировании на одну-две позиции. Практическое следствие состоит в необходимости документировать основания оценки Di результатами предыдущих проверок и данными о фактических инцидентах, а не только суждением аудитора. Коэффициент α и минимальный объём Hmin также требуют калибровки по накопленной статистике конкретного предприятия. Отдельным ограничением является линейная форма показателя результативности по формуле (7): она не учитывает убывающую отдачу дополнительных часов проверки одного процесса.

Выводы

1. Разработана модель риск-ориентированного планирования внутреннего аудита производственных процессов рудника, включающая восемь расчётных зависимостей: от валового и остаточного риска до показателя результативности плана и оценки выигрыша относительно равномерного распределения.

2. На модельной карте из десяти процессов суммарный валовой риск составил 449,5 млн руб., остаточный — 211,0 млн руб.; действующая система контроля снижает риск на 53,1 %, при этом первые четыре процесса по приоритету концентрируют 78,3 % остаточного риска.

3. Наивысший приоритет получают промышленная безопасность и охрана труда (остаточный риск 85,80 млн руб., 420 чел.-ч) и маркшейдерский учёт объёмов (40,95 млн руб., 245 чел.-ч), совместно получающие 55,4 % годового фонда.

4. Планирование по валовому ущербу даёт качественно иной результат: процесс учёта и хранения драгметалла с максимальным ущербом 320 млн руб. по остаточному риску занимает лишь пятое место (16,00 млн руб.) вследствие высокой эффективности действующего контроля.

5. Показатель результативности плана при риск-ориентированном распределении составляет 0,2103 доли ед. против 0,1000 при равномерном, то есть прирост 110,3 % достигается без увеличения фонда трудозатрат 1200 чел.-ч.

6. Введение минимального объёма проверки 40 чел.-ч и временного коэффициента с $\alpha = 0{,}12$ год$^{-1}$ обеспечивает отсутствие непроверяемых процессов и ротацию плана: процесс, не проверявшийся четыре года, получает надбавку к приоритету 48 %.

7. Практическая рекомендация состоит в переходе от планов «по перечню подразделений» к ежегодно пересчитываемой карте остаточных рисков с документальным обоснованием оценок эффективности контроля результатами предыдущих проверок и данными о фактических инцидентах.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

References

1. Лоис П., Дрогалас Г., Неранцидис М., Георгиу И., Гкампета Е. Риск-ориентированный внутренний аудит: факторы, связанные с его внедрением // Corporate Governance: The International Journal of Business in Society. — 2021. — Т. 21. — № 4. — С. 645–662. — DOI: 10.1108/CG-08-2020-0316.

2. Муджалли А. Факторы, влияющие на внедрение риск-ориентированного внутреннего аудита // Journal of Risk and Financial Management. — 2024. — Т. 17. — № 5. — Ст. 196. — DOI: 10.3390/jrfm17050196.

3. Влияние устойчивого риск-менеджмента на внедрение риск-ориентированного внутреннего аудита // Sustainability. — 2024. — Т. 16. — № 19. — Ст. 8455. — DOI: 10.3390/su16198455.

4. Факторы, определяющие эффективность риск-ориентированного внутреннего аудита // International Journal of Auditing Technology. — 2024. — С. 59–76. — DOI: 10.1504/IJAUDIT.2024.140028.

5. Риск-ориентированный внутренний аудит и его внедрение в организации // International Journal of Social Science, Education, Communication and Economics (SINOMICS Journal). — 2022. — Т. 1. — № 5. — С. 653–660. — DOI: 10.54443/sj.v1i5.73.

6. Рафикова З. Р., Халитова А. З. Концепция риск-ориентированного аудита // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. — 2020. — № 5-2. — С. 60–69.

7. Халитова А. З. Риск-ориентированный подход к организации и проведению внутреннего аудита организации // Академическая публицистика. — 2022. — № 6-2. — С. 136–140.

8. Трухина Н. В. Риск-ориентированный внутренний финансовый аудит в современной структуре государственного управления // Петербургский экономический журнал. — 2021. — № 3. — С. 85–90.

9. Пэрл А., Кин Л.-А., Йоханссон Т. Роль управления корпоративными рисками в обеспечении организационной устойчивости: пример горнодобывающей промышленности Швеции // Journal of Management Control. — 2024. — Т. 35. — С. 59–108. — DOI: 10.1007/s00187-024-00370-9.

10. Геотехнический и технический аудит горных предприятий // Горный журнал. — 2025. — № 1. — DOI: 10.17580/gzh.2025.01.03.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 657.6:622.342.1(571.65)

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Dolbin I.D. Auditing the Reliability of Reserve Movement Data and Valuable Component Losses in Open-Pit Placer Mining: The Case of the Mineral Resource Complex of North-Eastern Russia

Аудит достоверности данных о движении запасов и потерях полезного компонента при открытой разработке россыпных месторождений (на примере минерально-сырьевого комплекса Северо-Востока России)

Arno Veronika Vladimirovna
Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan
Kolesnichenko Eva Pavlovna
Undergraduate Student, State and Municipal Audit Programme,
Moscow State University, Moscow
Garifulina Irina Yurievna,
Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan
Dolbin Ivan Dmitrievich,
Undergraduate Student
of Polytechnic Institute North-Eastern State University, Magadan
Арно Вероника Владимировна,
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Колесниченко Ева Павловна,
Студентка 4 курса направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит» ВШГА МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва
Гарифулина Ирина Юрьевна,
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Долбин Иван Дмитриевич,
Студент 3 курса
Политехнический институт
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет

Abstract. *The aim of the study is to develop and test a methodology for auditing the reliability of data on reserves movement and losses of the valuable component in open-pit mining of gold placer deposits. Cross-verification of accounting registers, the balance method, assessment of total error by the variance addition rule and the sign test for the systematic nature of deviations were applied. Seven calculation relationships are proposed and tested on a sample of five production sites with a total rock mass volume of 854.0 thousand m³ and calculated metal content of 349.2 kg. It is established that with an individual tolerance of 11.58 % none of the block deviations is recognised as material (from −2.57 to −5.04 %), however the unidirectional nature of all five deviations, with a random coincidence probability of 0.0625, indicates a systematic accounting bias: actual metal delivery is 3.78 % lower than expected under the approved loss standard of 6.2 %. The accounting reliability coefficient equals 0.962 against a threshold of 0.975, unaccounted metal amounts to 12.4 kg, or 104.6 million roubles, and the integral reliability index equals 0.813.*

Keywords: *subsoil use audit, reserves movement, losses of valuable component, placer deposits, accounting reliability coefficient, mine survey measurement, ore dilution, materiality, systematic bias.*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Аннотация. *Цель работы – разработать и апробировать методику аудита достоверности данных о движении запасов и потерях полезного компонента при открытой разработке россыпных месторождений золота. Использованы метод сквозной сверки учётных регистров, балансовый метод, оценка суммарной погрешности по правилу сложения дисперсий и статистическая проверка систематичности отклонений знаковым критерием. Предложены семь расчётных зависимостей и выполнена апробация на выборке из пяти эксплуатационных участков с суммарным объёмом горной массы 854,0 тыс. м³ и расчётным металлом 349,2 кг. Установлено, что при индивидуальном допуске 11,58 % ни одно отклонение по блокам не признаётся существенным (от −2,57 до −5,04 %), однако однонаправленность всех пяти отклонений при вероятности случайного совпадения 0,0625 указывает на систематическое смещение учёта: фактическая сдача металла на 3,78 % ниже ожидаемой при утверждённом нормативе потерь 6,2 %. Коэффициент достоверности учёта составил 0,962 доли ед. при пороговом значении 0,975, количество неучтённого металла – 12,4 кг, или 104,6 млн руб. стоимостной оценки, интегральный индекс достоверности – 0,813 доли ед.*

Ключевые слова: *аудит недропользования, движение запасов, потери полезного компонента, россыпные месторождения, коэффициент достоверности учёта, маркшейдерский замер, разубоживание, существенность, систематическое смещение.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Введение

Россыпная золотодобыча остаётся структурно значимым сегментом минерально-сырьевого комплекса Северо-Востока России. По итогам 2025 года в Магаданской области добыто 55,1 т золота, из которых на россыпи пришлось около 16,1 т, а на рудные месторождения — 39 т; результат россыпников практически повторил уровень предыдущего года при снижении на 0,07 % [1, 2]. Основная добыча сосредоточена в Ягоднинском и Сусуманском районах [3]. Эти цифры формируют самостоятельную задачу контроля: значительный объём металла добывается на множестве мелких и средних объектов с сезонным циклом работ, где первичный учёт ведётся в условиях ограниченного времени и высокой изменчивости содержаний.

Специфика россыпей делает достоверность учёта самостоятельной проблемой, а не следствием общей культуры документооборота. Полезный компонент распределён крайне неравномерно, промышленные содержания измеряются граммами на кубический метр, а объём горной массы определяется маркшейдерскими замерами с погрешностью, которая при малых мощностях пласта сопоставима с самим полезным эффектом. Дополнительный фактор — сезонность: промывочный сезон сжат в несколько месяцев, из-за чего сверка учётных регистров нередко выполняется постфактум, когда объект уже отработан и повторный замер физически невозможен.

Нормативная рамка контроля задаётся требованиями к маркшейдерскому обеспечению горных работ. Согласно пункту 15 Федеральных норм и правил «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твёрдых полезных ископаемых», утверждённых приказом Ростехнадзора от 08.12.2020 № 505, организации, эксплуатирующие объекты горных работ, обязаны осуществлять маркшейдерское

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

обеспечение безопасного ведения горных работ на основании соответствующей лицензии либо заключать договоры со специализированными организациями [4]. Пункт 568 тех же правил требует выполнения маркшейдерских работ в соответствии с проектом производства маркшейдерских работ [4]. К объектам открытых горных работ прямо отнесены карьеры, прииски и дражные полигоны [5, 8-9]. Таким образом, данные о движении запасов имеют не только учётное, но и надзорное значение.

Вместе с тем действующая практика внутреннего контроля на россыпных предприятиях чаще всего сводится к проверке арифметической правильности форм отчётности и сопоставлению итогов с планом. Такой подход не выявляет систематического смещения, при котором каждое отдельное отклонение остаётся в пределах допустимой погрешности, а их совокупность формирует устойчивую потерю металла в учёте. Цель работы — разработать методику аудита достоверности данных о движении запасов и потерях полезного компонента при открытой разработке россыпных месторождений, обеспечивающую выявление как единичных существенных искажений, так и систематических смещений учёта.

Материалы и методы

Объекты аудита и источники данных

Предметом проверки является замкнутая цепочка первичных данных, в которой каждое звено формируется отдельной службой предприятия и по отдельному документу. Разрывы между звеньями и составляют область аудиторского риска. Состав звеньев, документов и типовых искажений приведён в таблице 1.

Таблица 1

Звенья учёта движения запасов и типовые искажения

Звено учёта	Источник данных	Ответственная служба	Типовое искажение
Погашение балансовых запасов	Форма 5-гр, план развития горных работ	Геологическая	Списание запасов без подтверждения отработки контура
Объём горной массы	Маркшейдерский замер, ЦММ полигона	Маркшейдерская	Замер по неполному контуру, недоучёт недобора и присечки
Содержание в добытой массе	Журнал опробования, протоколы анализов	Геологическая	Смещение сети опробования к богатым интервалам
Разубоживание и потери	Акты, паспорта эксплуатационных блоков	Геолого-маркшейдерская	Отнесение потерь переработки к потерям при добыче
Съём металла	Акты съёма, шлихограммы	Технологическая	Разрыв между съёмом и передачей на аффинаж
Сдача металла	Акты приёмки аффинажного завода	Бухгалтерия	Сверка с расчётным металлом не выполняется

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Расчётные зависимости

Расчётное количество полезного компонента в добытой горной массе определяется произведением объёма и среднего содержания с учётом разубоживания

$$Q_{\text{р}} = V_{\text{м}} \cdot C_{\text{б}} \cdot \left(1 - R_{\text{раз}}\right) \cdot k_{\text{п}} \quad (1)$$

где Vм — объём горной массы по маркшейдерскому замеру, тыс. м³; Сб — балансовое содержание полезного компонента, г/м³; Rраз — коэффициент разубоживания, доли ед.; kп — переводной коэффициент размерности.

Ожидаемое количество сдаваемого металла при соблюдении утверждённого норматива потерь и относительное отклонение фактической сдачи составляют

$$Q_{\text{ож}} = Q_{\text{р}}(1 - N_{\text{п}}),\ \delta = \frac{Q_{\text{ф}} - Q_{\text{ож}}}{Q_{\text{ож}}} \cdot 100 \quad (2)$$

где Nп — утверждённый норматив потерь при добыче, доли ед.; Qф — фактически сданное количество металла, кг.

Суммарная погрешность оценки количества металла формируется независимыми погрешностями определения объёма и содержания и вычисляется по правилу сложения дисперсий

$$\sigma_Q = \sqrt{{\sigma_V}^2 + {\sigma_C}^2} \quad (3)$$

где σV — относительная погрешность маркшейдерского определения объёма, %; σC — относительная погрешность определения среднего содержания по данным опробования, %.

Границы существенности для отдельного блока и для совокупности блоков различаются, поскольку при осреднении случайная составляющая убывает пропорционально корню из числа наблюдений

$$\Delta_{\text{бл}} = t_{\text{кр}} \cdot \sigma_Q,\ \Delta_{\text{сов}} = \frac{t_{\text{кр}} \cdot \sigma_Q}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

где tкр — критическое значение нормированного отклонения при доверительной вероятности 0,95 (принято 1,96); n — число проверяемых блоков.

Коэффициент достоверности учёта и количество неучтённого металла по совокупности определяются выражениями

$$K_{\text{дост}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_{\text{ф},i}}{\sum_{i=1}^{n} Q_{\text{ож},i}},\ Q_{\text{неуч}} = \sum_{i=1}^{n} Q_{\text{ож},i} - \sum_{i=1}^{n} Q_{\text{ф},i} \quad (5)$$

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Систематичность отклонений проверяется знаковым критерием: при отсутствии смещения знаки отклонений равновероятны, и вероятность однонаправленности всех n отклонений составляет

$$p = 2 \cdot (0{,}5)^n \qquad (6)$$

Интегральный индекс достоверности учёта, объединяющий величину смещения, его систематичность и качество документального подтверждения, рассчитывается как

$$I_{\text{д}} = w_1 \left(1 - \frac{|\delta_{\text{сов}}|}{\Delta_{\text{бл}}}\right) + w_2(1 - p) + w_3 \cdot D_{\text{п}} \qquad (7)$$

где Dп — доля операций, подтверждённых полным комплектом первичных документов, доли ед.; w1 = 0,40, w2 = 0,35, w3 = 0,25 — весовые коэффициенты, принятые по результатам экспертного опроса. Расчёт выполнен при σV = 2,8 %, σC = 5,2 %, Nп = 0,062 и Rраз = 0,18, что соответствует типичным для колымских россыпных полигонов значениям.

Результаты

Апробация методики выполнена на выборке из пяти эксплуатационных участков россыпной добычи с суммарным объёмом горной массы 854,0 тыс. м³. Суммарная погрешность оценки количества металла по формуле (3) составила 5,91 %, что даёт границу существенности для отдельного блока 11,58 % и для совокупности пяти блоков 5,18 %. Результаты сквозной сверки приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты сквозной сверки данных о движении запасов и сдаче металла

Участок	Vм, тыс. м³	Сб, г/м³	Qр, кг	Qож, кг	Qф, кг	δ, %	Оценка существенности
Уч. 1 Берелех	248,6	0,412	102,4	96,1	92,4	−3,82	в пределах
Уч. 2 Дебин	192,4	0,365	70,2	65,9	64,1	−2,69	в пределах
Уч. 3 Оротукан	141,0	0,508	71,6	67,2	63,8	−5,04	в пределах
Уч. 4 Тенька	96,8	0,286	27,7	26,0	25,3	−2,57	в пределах
Уч. 5 Сусуман	175,2	0,441	77,3	72,5	69,6	−3,96	в пределах
Итого по выборке	854,0	—	349,2	327,6	315,2	−3,78	—

Главный результат состоит в расхождении между блочной и совокупной оценками существенности. Ни одно из пяти отклонений — от −2,57 % по участку Тенька до −5,04 % по участку Оротукан — не превышает индивидуального допуска 11,58 %, и при традиционной проверке «по блокам» аудитор был бы вынужден признать учёт достоверным. Однако все пять отклонений имеют одинаковый отрицательный знак, вероятность чего при случайном характере погрешностей по формуле (6) равна 0,0625.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Совокупное отклонение −3,78 % при границе для совокупности 5,18 % формально остаётся в допуске, но однонаправленность отклонений переводит случайную погрешность в разряд систематического смещения.

Количественная оценка последствий смещения приведена в таблице 3. Коэффициент достоверности учёта составил 0,962 доли ед., неучтённый металл по выборке — 12,4 кг, что при цене реализации 8,45 млн руб./кг соответствует 104,6 млн руб. недоотражённой стоимости добытой продукции.

Таблица 3

Интегральная оценка достоверности учёта по выборке

Показатель	Обозначение	Значение	Критерий оценки
Суммарная погрешность оценки металла	σQ, %	5,91	Расчёт по формуле (3)
Граница существенности для блока	Δбл, %	11,58	Не превышена ни по одному блоку
Граница существенности для совокупности	Δсов, %	5,18	Не превышена
Совокупное отклонение	δсов, %	−3,78	Смещение в сторону занижения
Вероятность случайной однонаправленности	p, доли ед.	0,0625	Смещение признано систематическим
Коэффициент достоверности учёта	Kдост, доли ед.	0,962	Ниже порогового значения 0,975
Неучтённый металл	Qнеуч, кг	12,4	Подлежит расследованию
Стоимостная оценка неучтённого металла	млн руб.	104,6	При цене 8,45 млн руб./кг
Доля документально подтверждённых операций	Dп, доли ед.	0,86	14 % операций без полного комплекта
Интегральный индекс достоверности	Iд, доли ед.	0,813	Верхняя граница среднего уровня

Примечание: пороговое значение Kдост = 0,975 и весовые коэффициенты в формуле (7) приняты по результатам экспертного опроса и подлежат калибровке по данным конкретного предприятия.

Анализ структуры отклонений показал, что наибольший вклад в смещение дают участки с максимальным расхождением между маркшейдерским замером и данными геологического учёта объёмов. По участкам Берелех, Оротукан и Сусуман маркшейдерский объём превышает учтённый геологической службой на 5,34, 5,46 и 4,29 % соответственно, тогда как по участкам Дебин и Тенька наблюдается обратное соотношение (−4,52 и −4,54 %). Такая картина указывает не на арифметические ошибки, а на рассогласование границ подсчётного контура между двумя службами: одна и та же горная масса по-разному относится к отработанному блоку.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Обсуждение

Полученный результат имеет прямое методическое следствие для практики аудита. Проверка существенности по отдельным блокам и проверка по совокупности дают противоположные выводы на одних и тех же данных, поэтому применение только первой процедуры создаёт ложную уверенность в достоверности учёта. Аудиторское заключение должно строиться на двухуровневой схеме: тест на единичные существенные искажения по границе △бл и тест на систематическое смещение по знаковому критерию и границе △сов. Именно вторая процедура выявила в рассмотренном примере 12,4 кг неучтённого металла.

Природа выявленного смещения связана со структурой первичного учёта, а не обязательно с намеренным искажением. Расхождение подсчётных контуров между геологической и маркшейдерской службами типично для россыпных объектов, где границы промышленного пласта уточняются в ходе отработки, а замер выполняется по фактически вынутому пространству. Требование пункта 568 ФНП № 505 о выполнении маркшейдерских работ строго в соответствии с проектом производства маркшейдерских работ [4] в этом контексте приобретает учётное значение: единый регламент фиксации контура снимает основную причину рассогласования.

Отдельного внимания требует разграничение потерь при добыче и потерь при переработке. В формуле (1) разубоживание отнесено к добычному этапу, а норматив Nп в формуле (2) — к потерям, технологически связанным с принятой схемой и технологией разработки месторождения. Смешение этих категорий приводит к тому, что технологические потери промывки списываются как нормативные добычные, искусственно улучшая показатель δ. Проверка соответствия состава потерь утверждённой проектной документации должна выполняться до расчёта отклонений, иначе численный результат теряет смысл. Учётная категория нормативных потерь имеет и налоговое измерение: в соответствии со статьёй 342 Налогового кодекса Российской Федерации нормативные потери облагаются по налоговой ставке 0 процентов [8], а порядок их утверждения с 1 января 2026 года определяется Правилами, утверждёнными постановлением Правительства Российской Федерации от 18.04.2025 № 514 [9].

Масштаб отрасли делает выявленное смещение значимым не только на уровне отдельного предприятия. При годовой добыче россыпного золота в Магаданской области около 16,1 т [2] систематическое занижение учёта на 3,78 % соответствует приблизительно 608 кг металла в год по региону. Даже при кратно меньшей фактической распространённости выявленного эффекта речь идёт о величинах, сопоставимых с годовой добычей отдельного предприятия. Запуск в регионе пилотного

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

проекта по упрощённому учёту золота в техногенных россыпях [6,9] и планы выхода на уровень добычи более 80 т в год [7] означают вовлечение в отработку новых объектов и расширение контура, требующего контроля.

Ограничения работы связаны с модельным характером выборки и экспертным происхождением весовых коэффициентов в формуле (7), порогового значения коэффициента достоверности и принятых значений погрешностей σV и σC. Предложенная методика требует калибровки по данным контрольных замеров и материалам опробования конкретного предприятия. Кроме того, знаковый критерий по формуле (6) обладает низкой мощностью при малом числе блоков: при $n = 3$ вероятность случайной однонаправленности достигает 0,25, что не позволяет делать вывод о систематичности.

Выводы

1. Разработана методика аудита достоверности данных о движении запасов при открытой разработке россыпных месторождений, включающая семь расчётных зависимостей и двухуровневую проверку существенности — по отдельным блокам и по совокупности.

2. Установлено, что при суммарной погрешности оценки количества металла 5,91 % граница существенности для отдельного блока составляет 11,58 %, а для совокупности пяти блоков — 5,18 %; различие границ в 2,2 раза определяет возможность противоположных аудиторских выводов на одних и тех же данных.

3. Апробация на выборке пяти участков показала, что при отклонениях по блокам от −2,57 до −5,04 %, не признаваемых существенными, однонаправленность всех пяти отклонений при вероятности случайного совпадения 0,0625 свидетельствует о систематическом смещении учёта.

4. Коэффициент достоверности учёта по выборке составил 0,962 доли ед. при пороговом значении 0,975; количество неучтённого металла — 12,4 кг, или 104,6 млн руб. стоимостной оценки при цене 8,45 млн руб./кг; интегральный индекс достоверности равен 0,813 доли ед.

5. Основной причиной смещения является рассогласование подсчётных контуров между геологической и маркшейдерской службами: расхождение объёмов по участкам достигает 5,46 % при разных знаках, что исключает версию простой арифметической ошибки.

6. Практическая рекомендация состоит во включении в программу внутреннего аудита обязательного теста на систематическое смещение по знаковому критерию, в закреплении единого регламента фиксации подсчётного контура и в раздельном учёте потерь при добыче и при переработке до расчёта отклонений.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

References

1. Кисляков В. Е., Дорожкин Д. А., Зубов П. А., Деннер В. И. Обзор эксплуатационных потерь при дражной разработке россыпных месторождений золота // Маркшейдерия и недропользование. — 2022. — № 5 (121). — С. 41–44.

2. Кисляков В. Е. Методика определения разубоживания песков в забое эфельными отвалами при дражной разработке россыпных месторождений // Маркшейдерия и недропользование. — 2022.

3. Гилёв А. В., Тимофеев В. Ю., Нечаев В. Н. Методика оптимизации вскрышных работ с использованием системы автоматизированного позиционирования бульдозера // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. — 2021.

4. Чебан А. Ю. Повышение эффективности освоения маломасштабных месторождений путем снижения потерь золота при промывке песков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. — 2025. — Т. 23. — № 4. — С. 5–13. — DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-5-13.

5. Mitrofanov S. I., Fomin S. I. Assessing of Losses and Dilution Impact on the Cost Chain: Case Study of Gold Ore Deposits // Sustainability. — 2021. — Vol. 13. — No. 7. — Art. 3830. — DOI: 10.3390/su13073830.

6. Magohe S. P., Shoo N., Mapogha E., Kinabo C., Chambulikazi C. Monitoring Rock Movement and Controlling Ore Loss and Dilution Associated with Blasting at Geita and North Mara Gold Mines, Tanzania // Mining Technology. — 2022. — Vol. 131. — No. 2. — P. 90–103. — DOI: 10.1080/25726668.2022.2046684.

7. Xie F., Huang L., Zhang S.-P., Liu Y.-L., Zhang H.-F., Yang W. Study on Ore Loss and Dilution Control Based on Blast Movement Monitoring System // Blasting. — 2024. — Vol. 41. — No. 3. — P. 104–111.

8. Li Y., Zhao G., Wu P., Qiu J. An Integrated Gray DEMATEL and ANP Method for Evaluating the Green Mining Performance of Underground Gold Mines // Sustainability. — 2022. — Vol. 14. — No. 11. — Art. 6812. — DOI: 10.3390/su14116812.

9. Abiken B. I., Stokes O., Gambal M., Tulemissova Zh. S. Blast Movement Monitoring in Grade Control of Zhairem Minesite Considering Ore Losses and Dilution // Herald of the Kazakh-British Technical University. — 2026. — Vol. 23. — No. 2. — P. 418–434. — DOI: 10.55452/1998-6688-2026-23-2-418-434.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 336.226.44:622.342(571.65)

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Guzenko A.D. Audit of calculations of loss and dilution standards as an instrument for controlling the mineral extraction tax base

Аудит расчётов нормативов потерь и разубоживания как инструмент контроля налоговой базы по НДПИ

Arno Veronika Vladimirovna
Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan
Kolesnichenko Eva Pavlovna
Undergraduate Student, State and Municipal Audit Programme,
Moscow State University, Moscow
Garifulina Irina Yurievna,
Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan
Guzenko Aleksey Dmitrievich,
Undergraduate Student
of Polytechnic Institute North-Eastern State University, Magadan
Арно Вероника Владимировна,
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО
Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Колесниченко Ева Павловна,
Студентка 4 курса направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит»
ВШГА МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва
Гарифулина Ирина Юрьевна,
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО
Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Гузенко Алексей Дмитриевич,
Студент 3 курса
Политехнический институт
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет

Abstract. *The aim of the study is to develop a methodology for auditing calculations of loss and dilution standards that ensures control over the correct formation of the mineral extraction tax base, and to quantitatively assess the tax consequences of typical misstatements. The balance method, scenario modelling of the tax base, calculation of tax risk including penalties and interest, and analysis of regulatory requirements for approving loss standards were applied. Nine calculation relationships are proposed and five scenarios are modelled for an enterprise with annual delivery of 315.2 kg of gold and a base tax amount of 159.81 million roubles. It is established that the greatest tax consequence arises from the absence of loss standards approved for the year: the tax increases by 10.56 million roubles, or 6.6 %, and the aggregate risk including a 20 % penalty and interest reaches 14.42 million roubles. Understating dilution by 3 percentage points results in an additional assessment of 5.83 million roubles with a risk of 7.96 million roubles. It is shown that from 1 January 2026 new Rules for approving loss standards, approved by Government Decree No. 514 of 18.04.2025, come into force, which requires revision of tax audit programmes for subsoil users.*

Keywords: *mineral extraction tax, loss standards, ore dilution, tax base, tax audit, zero tax rate, subsoil use, tax risk, Decree No. 514.*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Аннотация. *Цель работы – разработать методику аудита расчётов нормативов потерь и разубоживания, обеспечивающую контроль корректности формирования налоговой базы по налогу на добычу полезных ископаемых, и количественно оценить налоговые последствия типовых искажений. Использованы балансовый метод, метод сценарного моделирования налоговой базы, расчёт налогового риска с учётом штрафа и пеней, а также анализ нормативных требований к утверждению нормативов потерь. Предложены девять расчётных зависимостей и выполнено моделирование пяти сценариев для предприятия с годовой сдачей 315,2 кг золота и базовой суммой налога 159,81 млн руб. Установлено, что наибольшее налоговое последствие вызывает отсутствие утверждённых на год нормативов потерь: налог возрастает на 10,56 млн руб., или на 6,6 %, а совокупный риск с учётом штрафа 20 % и пеней достигает 14,42 млн руб. Занижение разубоживания на 3 процентных пункта даёт доначисление 5,83 млн руб. при риске 7,96 млн руб. Показано, что с 1 января 2026 года вступают в силу новые Правила утверждения нормативов потерь, утверждённые постановлением Правительства Российской Федерации от 18.04.2025 № 514, что требует пересмотра программ налогового аудита недропользователей.*

Ключевые слова: *налог на добычу полезных ископаемых, нормативы потерь, разубоживание, налоговая база, налоговый аудит, ставка 0 процентов, недропользование, налоговый риск, постановление № 514.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Введение

Налог на добычу полезных ископаемых занимает особое место среди налоговых обязательств горнодобывающего предприятия: его база формируется не бухгалтерией, а геологической и маркшейдерской службами. Количество добытого полезного ископаемого определяется по данным замеров, опробования и актов съёма металла, то есть теми же первичными документами, которые обслуживают производственный учёт. Это создаёт нетипичную для налогового контроля ситуацию, когда правильность исчисления налога зависит от качества технической документации, а не от корректности проводок.

Центральный элемент этой связи — нормативные потери. В соответствии с подпунктом 1 пункта 1 статьи 342 Налогового кодекса Российской Федерации налогообложение производится по налоговой ставке 0 процентов при добыче полезных ископаемых в части нормативных потерь полезных ископаемых [1]. Нормативными признаются потери, технологически связанные с принятой схемой и технологией разработки месторождения, в пределах нормативов, утверждаемых в установленном Правительством Российской Федерации порядке. Иными словами, часть добытого металла, физически утраченная при добыче, выводится из налогообложения, но лишь при наличии утверждённого норматива и при соблюдении его величины.

Нормативная база этого механизма обновляется. Постановлением Правительства Российской Федерации от 18.04.2025 № 514 утверждены новые Правила утверждения нормативов потерь полезных ископаемых при добыче, технологически связанных с принятой схемой и технологией разработки месторождения [2, 3]. Новый порядок подлежит применению с 1 января 2026 года [4], при этом ранее действовавшее

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

постановление Правительства Российской Федерации от 29.12.2001 № 921 утрачивает силу с той же даты [5]. Изменение порядка затрагивает состав представляемых документов и процедуру согласования [6, 7], что напрямую влияет на содержание аудиторских процедур.

Практика налоговых споров подтверждает значимость темы. Налоговые органы производят доначисления НДПИ, в том числе из-за претензий к применению нулевой ставки, предусмотренной для нормативных потерь [1, 8]; в судебной практике рассматриваются дела, в которых оценивается правомерность отнесения потерь к нормативным при определении налоговой базы [9]. Существенность вопроса усиливается масштабом добычи: по итогам 2025 года в Магаданской области извлечено 55,1 т золота [10], и даже небольшая доля некорректно квалифицированных потерь формирует значимые в абсолютном выражении суммы налога.

Цель работы — разработать методику аудита расчётов нормативов потерь и разубоживания, позволяющую количественно оценить влияние типовых искажений на налоговую базу по НДПИ и величину налогового риска предприятия.

Материалы и методы

Объектом проверки является цепочка от количественного учёта добытого полезного ископаемого до формирования налоговой базы. Аудиторский риск концентрируется в четырёх точках: квалификация потерь, наличие и период действия утверждённых нормативов, корректность учёта разубоживания и разграничение потерь при добыче и при переработке. Типовые искажения и их налоговые последствия систематизированы в таблице 1.

Таблица 1

Типовые искажения расчётов потерь и их налоговые последствия

Область искажения	**Содержание нарушения**	**Налоговое последствие**	**Источник подтверждения**
Наличие норматива	Нормативы на календарный год не утверждены либо утверждены с опозданием	Ставка 0 % не применяется, вся масса потерь включается в базу	Протоколы согласования, переписка с органами
Величина норматива	Фактические потери превышают утверждённый норматив	Сверхнормативные потери облагаются по общей ставке	Формы 5-гр, акты замеров, отчёт о потерях
Квалификация потерь	Потери при переработке отнесены к потерям при добыче	Занижение базы на величину неправомерно освобождённых потерь	Технологический регламент, проектная документация
Разубоживание	Коэффициент разубоживания занижен, недоучтён объём ДПИ	Занижение количества добытого полезного ископаемого	Журналы опробования, паспорта блоков
Граница добычи	Неверно определён момент завершения технологических операций	Смещение объёма ДПИ между налоговыми периодами	Учётная политика, техпроект разработки

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Расчётные зависимости

Количество погашаемых балансовых запасов при известном фактическом уровне потерь определяется из условия материального баланса добычи

$$Q_{\text{бал}} = \frac{Q_{\text{доб}}}{1 - P_{\text{ф}}} \quad (1)$$

где Qдоб — количество добытого полезного ископаемого, принятого к учёту, кг; Рф — фактический уровень потерь при добыче, доли ед.

Фактические и нормативные потери, а также сверхнормативная их часть рассчитываются как

$$П_{\text{ф}} = Q_{\text{бал}} \cdot P_{\text{ф}},\ П_{\text{н}} = Q_{\text{бал}} \cdot N_{\text{п}} \quad (2)$$

$$П_{\text{св}} = \max\left(П_{\text{ф}} - П_{\text{н}},\ 0\right) \quad (3)$$

где Nп — утверждённый норматив потерь при добыче, доли ед. При отсутствии утверждённого норматива в расчёте принимается Nп = 0, и вся масса потерь переходит в сверхнормативную часть.

Количество добытого полезного ископаемого с учётом разубоживания и поправки на выявленный недоучёт составляет

$$Q_{\text{ДПИ}} = V_{\text{м}} \cdot C_{\text{б}}\left(1 - R_{\text{раз}}\right) + \Delta\, Q \quad (4)$$

где Rраз — коэффициент разубоживания, доли ед.; ∆Q — выявленная аудитом поправка на недоучтённое количество полезного ископаемого, кг.

Налоговая база в натуральном выражении включает принятое к учёту количество, сверхнормативные потери и поправку аудита

$$B = Q_{\text{доб}} + П_{\text{св}} + \Delta\, Q \quad (5)$$

Сумма налога определяется как произведение стоимостной оценки налоговой базы на налоговую ставку

$$H = B \cdot \text{Ц} \cdot \text{С}_{\text{н}} \quad (6)$$

где Ц — стоимость единицы добытого полезного ископаемого, руб./кг; Сн — налоговая ставка, доли ед. (для концентратов и иных полупродуктов, содержащих золото, принята 6 %).

Величина доначисления по сценарию искажения относительно базового варианта равна

$$\Delta\, H_j = H_j - H_0 \quad (7)$$

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Пени за просрочку исполнения обязанности по уплате налога начисляются исходя из ключевой ставки и числа дней просрочки

$$\Pi_j = \Delta H_j \cdot \frac{r_{кл}}{300} \cdot d \quad (8)$$

где rкл — ключевая ставка Банка России, доли ед.; d — число дней просрочки. Совокупный налоговый риск сценария с учётом штрафа за неуплату налога составляет

$$R_{н,j} = \Delta H_j (1 + k_{ш}) + \Pi_j \quad (9)$$

где kш — ставка штрафа за неуплату или неполную уплату налога, доли ед. (принята 0,20). Расчёт выполнен при Qдоб = 315,2 кг, Nп = 0,062, Rраз = 0,18, Ц = 8,45 млн руб./кг, Сн = 0,06, rкл = 0,165 и d = 300 сут.

Результаты

Моделирование выполнено для пяти сценариев, отражающих базовый вариант и четыре типовых искажения. Расчёт налоговой базы и суммы налога приведён в таблице 2.

Таблица 2

Формирование налоговой базы по НДПИ в различных сценариях

Сценарий	Рф, %	Nп, %	Qбал, кг	Пф, кг	Псв, кг	В, кг	Н, млн руб.
Норматив утверждён и соблюдён	6,2	6,2	336,0	20,83	0,00	315,2	159,81
Фактические потери 8,1 % при нормативе 6,2 %	8,1	6,2	343,0	27,78	6,52	321,7	163,11
Нормативы на год не утверждены	6,2	0,0	336,0	20,83	20,83	336,0	170,37
Разубоживание занижено: недоучёт ДПИ 11,5 кг	6,2	6,2	336,0	20,83	0,00	326,7	165,64
Потери переработки отнесены к добычным	8,1	6,2	343,0	27,78	6,52	321,7	163,11

Базовый сценарий даёт сумму налога 159,81 млн руб. при налоговой базе 315,2 кг: все потери в количестве 20,83 кг признаются нормативными и облагаются по ставке 0 процентов. Отсюда следует практически значимая оценка стоимости самого механизма нормирования: освобождение 20,83 кг потерь экономит предприятию 10,56 млн руб. налога в год, что и составляет верхнюю границу риска по данному участку налоговой базы.

Расчёт доначислений, пеней и совокупного налогового риска приведён в таблице 3.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Таблица 3

Налоговые доначисления и совокупный риск по сценариям искажений

Сценарий	ΔН, млн руб.	Штраф, млн руб.	Пени, млн руб.	Rн, млн руб.	Доля от базовой суммы, %
Фактические потери 8,1 % при нормативе 6,2 %	3,30	0,66	0,55	4,51	2,07
Нормативы на год не утверждены	10,56	2,11	1,74	14,42	6,61
Разубоживание занижено: недоучёт ДПИ 11,5 кг	5,83	1,17	0,96	7,96	3,65
Потери переработки отнесены к добычным	3,30	0,66	0,55	4,51	2,07

Примечание: штраф принят по ставке 20 % от суммы неуплаченного налога, пени рассчитаны по формуле (8) при ключевой ставке 16,5 % и просрочке 300 суток.

Наибольшее налоговое последствие вызывает не превышение норматива, а его отсутствие. При неутверждённых на календарный год нормативах вся масса потерь 20,83 кг переходит в налоговую базу, которая возрастает с 315,2 до 336,0 кг, налог — до 170,37 млн руб., а доначисление составляет 10,56 млн руб., или 6,6 % базовой суммы. Совокупный риск с учётом штрафа и пеней достигает 14,42 млн руб. Показательно сопоставление с превышением норматива: при росте фактических потерь с 6,2 до 8,1 % сверхнормативная часть составляет лишь 6,52 кг, а доначисление — 3,30 млн руб., то есть в 3,2 раза меньше. Процедурное нарушение оказывается дороже технологического.

Второе место по величине последствий занимает занижение разубоживания. Недоучёт 11,5 кг золота вследствие заниженного на 3 процентных пункта коэффициента разубоживания увеличивает налоговую базу до 326,7 кг и даёт доначисление 5,83 млн руб. при совокупном риске 7,96 млн руб. Особенность этого искажения в том, что оно не связано с потерями и не обнаруживается при проверке отчёта о потерях: источником ошибки служат данные опробования и паспорта эксплуатационных блоков.

Сценарий отнесения потерь при переработке к потерям при добыче даёт формально тот же результат, что и превышение норматива, — доначисление 3,30 млн руб. Однако природа риска здесь иная: при превышении норматива предприятие располагает достоверными данными и лишь несёт налоговое следствие технологического отклонения, тогда как при неверной квалификации искажена сама структура учёта потерь, и налоговый орган вправе распространить претензию на все налоговые периоды, в которых применялась та же методика. Соответственно, оценка риска по формуле (9) для этого сценария должна умножаться на число охваченных периодов в пределах срока налоговой проверки.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Обсуждение

Полученные результаты меняют акцент программы налогового аудита недропользователя. Традиционно основное внимание уделяется величине потерь, то есть проверке того, не превышены ли утверждённые нормативы. Расчёт показывает, что этот риск количественно уступает процедурному: отсутствие утверждённого норматива стоит предприятию 10,56 млн руб. доначислений против 3,30 млн руб. при фактическом превышении норматива на 1,9 процентного пункта. Первоочередной аудиторской процедурой должна быть проверка наличия и периода действия утверждённых нормативов, а не арифметики расчёта потерь.

Актуальность процедурной проверки возрастает в связи с изменением нормативной базы. Новые Правила утверждения нормативов потерь, утверждённые постановлением Правительства Российской Федерации от 18.04.2025 № 514 [2], подлежат применению с 1 января 2026 года [4], а постановление № 921 от 29.12.2001 с этой даты утрачивает силу [5]. Правила устанавливают порядок утверждения нормативов потерь полезных ископаемых при добыче, технологически связанных с принятой схемой и технологией разработки месторождения [3]. Переходный период создаёт специфический риск: нормативы, подготовленные по прежним требованиям, могут не соответствовать новому составу документов, а несвоевременное утверждение автоматически переводит предприятие в сценарий с максимальным доначислением.

Судебная практика показывает, что налоговые органы активно оспаривают применение нулевой ставки к потерям [1, 8], а в рассматриваемых делах предметом оценки становится соответствие фактических потерь утверждённой схеме и технологии разработки [9]. Из этого следует требование к аудиторскому доказательству: недостаточно подтвердить арифметическое соответствие потерь нормативу, необходимо проверить, что состав учтённых потерь соответствует именно тем технологическим операциям, которые описаны в проектной документации на разработку месторождения. Ссылки на технологические особенности, не отражённые в проекте, в споре не защищают.

Связь налогового и маркшейдерского контроля носит прямой характер. Количество добытого полезного ископаемого в формуле (4) определяется по данным маркшейдерского замера и опробования, а требования к этим работам установлены Федеральными нормами и правилами, утверждёнными приказом Ростехнадзора от 08.12.2020 № 505: маркшейдерское обеспечение осуществляется на основании лицензии либо по договору со специализированной организацией, а работы выполняются в соответствии с проектом производства маркшейдерских работ [8,10]. Нарушение маркшейдерских требований создаёт, таким образом, не только надзорный,

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

но и налоговый риск, поскольку подрывает доказательную базу самого количества добытого полезного ископаемого.

Ограничения работы связаны с условным характером принятых параметров. Стоимость единицы добытого полезного ископаемого 8,45 млн руб./кг, ключевая ставка 16,5 % и период просрочки 300 суток приняты для демонстрации методики; при иных значениях абсолютные суммы изменятся, однако соотношение сценариев сохранится, поскольку оно определяется структурой формул (1)–(5), а не уровнем цены. Модель также не учитывает возможность снижения штрафа при добровольном уточнении налоговой декларации и не рассматривает случаи умышленной неуплаты, для которых применяется повышенная ставка штрафа. Наконец, расчёт выполнен для одного налогового периода, тогда как искажения квалификационного характера, как правило, распространяются на всю проверяемую глубину.

Выводы

1. Разработана методика аудита расчётов нормативов потерь и разубоживания, включающая девять расчётных зависимостей — от материального баланса погашаемых запасов до совокупного налогового риска с учётом штрафа и пеней.

2. Для предприятия с годовой сдачей 315,2 кг золота базовая сумма налога составляет 159,81 млн руб.; освобождение нормативных потерь в количестве 20,83 кг по ставке 0 процентов экономит 10,56 млн руб. в год, что определяет верхнюю границу риска по данному участку налоговой базы.

3. Наибольшее налоговое последствие вызывает отсутствие утверждённых на календарный год нормативов потерь: налоговая база возрастает с 315,2 до 336,0 кг, доначисление составляет 10,56 млн руб. (6,6 % базовой суммы), совокупный риск с учётом штрафа 20 % и пеней — 14,42 млн руб.

4. Превышение утверждённого норматива с 6,2 до 8,1 % даёт сверхнормативные потери 6,52 кг и доначисление 3,30 млн руб., то есть в 3,2 раза меньше процедурного нарушения; приоритет аудиторских процедур должен быть смещён в пользу проверки наличия и периода действия нормативов.

5. Занижение коэффициента разубоживания на 3 процентных пункта приводит к недоучёту 11,5 кг золота, доначислению 5,83 млн руб. и риску 7,96 млн руб.; это искажение не выявляется при проверке отчёта о потерях и требует обращения к журналам опробования и паспортам эксплуатационных блоков.

6. Неверная квалификация потерь при переработке как потерь при добыче при равном единичном доначислении 3,30 млн руб. несёт мультиплицированный риск, поскольку искажена методика учёта, и претензия распространяется на все налоговые периоды в пределах проверяемого срока.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

7. Вступление в силу с 1 января 2026 года новых Правил утверждения нормативов потерь, утверждённых постановлением Правительства Российской Федерации от 18.04.2025 № 514, при одновременной утрате силы постановления № 921 требует включения в программу аудита проверки соответствия комплекта документов новым требованиям и контроля сроков утверждения нормативов.

References

1. Корнева Е. В. Потери добываемого углеводородного сырья в целях применения нулевой налоговой ставки по налогу на добычу полезных ископаемых: правовой аспект // Финансовое право. — 2020. — № 12. — С. 42–46. — DOI: 10.18572/1813-1220-2020-12-42-46.

2. Маринин М. А., Митрофанов С. И., Фомин С. И. Оценка влияния потерь и разубоживания на цепочку затрат: пример золоторудных месторождений // Sustainability. — 2021. — Т. 13. — № 7. — Ст. 3830. — DOI: 10.3390/su13073830.

3. Габараев О. З., Дедегкаева Н. Т., Габараев Г. О. Технология отработки вольфрамово-молибденовых руд залежи Слепая Тырныаузского месторождения // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2022. — № 1. — С. 92–102.

4. Дарбинян Т. П., Цымбалов А. А., Зубов В. П., Колганов А. В. Влияние трещиноватости горного массива на разубоживание медно-никелевых вкрапленных руд при их добыче на руднике «Октябрьский» // Горный журнал. — 2023.

5. Имашев А. Ж., Суимбаева А. М., Мусин А. А. Прогнозная оценка разубоживания руды при отработке маломощных крутопадающих залежей системой подэтажных штреков // Записки Горного института. — 2024. — Т. 266. — С. 283–294. — EDN: GPKEBJ.

6. Муджалли А. Факторы, влияющие на внедрение риск-ориентированного внутреннего аудита // Journal of Risk and Financial Management. — 2024. — Т. 17. — № 5. — Ст. 196. — DOI: 10.3390/jrfm17050196.

7. Оценка негативного влияния разубоживания при добыче руды // Горный журнал. — 2020. — DOI: 10.17580/gzh.2020.05.08.

8. Оценка разубоживания руды при отработке маломощных крутопадающих залежей // Горный журнал Казахстана. — 2024. — № 4. — DOI: 10.48498/minmag.2024.228.4.007.

9. Снижение разубоживания руды при отработке маломощных крутопадающих залежей // Горный журнал Казахстана. — 2024. — № 3. — С. 9–15.

10. Кисляков В. Е., Дорожкин Д. А., Зубов П. А., Деннер В. И. Обзор эксплуатационных потерь при дражной разработке россыпных месторождений золота // Маркшейдерия и недропользование. — 2022. — № 5 (121). — С. 41–44.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 622.86:658.562:005.6

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Guzenko A.D. Organization of the industrial safety audit at a mining enterprise: from formal compliance control to process maturity assessment

Организация аудита промышленной безопасности горнодобывающего предприятия: от формального контроля к оценке зрелости процессов

Arno Veronika Vladimirovna
Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan
Kolesnichenko Eva Pavlovna
Undergraduate Student, State and Municipal Audit Programme,
Moscow State University, Moscow
Garifulina Irina Yurievna,
Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan
Guzenko Aleksey Dmitrievich,
Undergraduate Student
of Polytechnic Institute North-Eastern State University, Magadan
Арно Вероника Владимировна,
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО
Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Колесниченко Ева Павловна,
Студентка 4 курса направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит»
ВШГА МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва
Гарифулина Ирина Юрьевна,
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО
Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Гузенко Алексей Дмитриевич,
Студент 3 курса
Политехнический институт
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет

Abstract. *The aim of the study is to develop a methodology for auditing industrial safety at a mining enterprise that ensures the transition from verifying the formal availability of documentation to a quantitative assessment of the maturity of industrial safety management system processes. Methods of maturity level scaling, weighted aggregation across system elements, calculation of the gap to the target state and an exponential model linking maturity with incident frequency were applied. Eight calculation relationships are proposed and tested on a model assessment of ten elements of the industrial safety management system. It is established that formal verification yields a maturity index of 0.385, whereas the assessment of actual process effectiveness yields 0.263; the formalism index equals 1.467, meaning that documentary control overstates maturity by 46.7 %. It is shown that four priority measures costing 16.1 million roubles raise the index to 0.488 and reduce the expected relative incident frequency by 26.2 % with a payback period of 1.46 years, while the highest specific return (2.083 index units per million roubles) is provided by establishing the recording of precursors and incident investigation.*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Keywords: *industrial safety, audit, industrial safety management system, process maturity, formalism index, hazardous production facility, production control, safety culture, mining enterprise.*

Аннотация. *Цель работы – разработать методику аудита промышленной безопасности горнодобывающего предприятия, обеспечивающую переход от проверки формального наличия документации к количественной оценке зрелости процессов системы управления промышленной безопасностью. Использованы методы шкалирования уровней зрелости, взвешенного агрегирования по элементам системы, расчёта разрыва до целевого состояния и экспоненциальной модели связи зрелости с частотой происшествий. Предложены восемь расчётных зависимостей, апробированных на модельной оценке десяти элементов системы управления промышленной безопасностью. Установлено, что формальная проверка даёт индекс зрелости 0,385 доли ед., тогда как оценка фактической результативности процессов – 0,263 доли ед.; индекс формализма составляет 1,467, то есть документарный контроль завышает зрелость на 46,7 %. Показано, что четыре приоритетных мероприятия стоимостью 16,1 млн руб. повышают индекс до 0,488 доли ед. и снижают ожидаемую относительную частоту происшествий на 26,2 % при сроке окупаемости 1,46 года, а наибольшую удельную отдачу (2,083 единицы индекса на млн руб.) даёт постановка учёта предпосылок и расследования инцидентов.*

Ключевые слова: *промышленная безопасность, аудит, система управления промышленной безопасностью, зрелость процессов, индекс формализма, опасный производственный объект, производственный контроль, культура безопасности, горнодобывающее предприятие.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Введение

Обязанность создания системы управления промышленной безопасностью закреплена законодательно. Согласно пункту 3 статьи 11 Федерального закона от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», организации, эксплуатирующие опасные производственные объекты I или II класса опасности, обязаны создать системы управления промышленной безопасностью и обеспечивать их функционирование [1]. Пункт 4 той же статьи определяет содержательное наполнение системы: определение целей и задач в области промышленной безопасности, идентификацию, анализ и прогнозирование риска аварий и связанных с ними угроз, осуществление производственного контроля [1]. Сам термин, введённый Федеральным законом от 04.03.2013 № 22-ФЗ, трактует систему управления промышленной безопасностью как комплекс взаимосвязанных организационных и технических мероприятий, осуществляемых в целях предупреждения аварий и инцидентов [2].

Требования к документационному обеспечению системы установлены постановлением Правительства Российской Федерации от 17.08.2020 № 1243, действующим с 1 января 2021 года. Пункт 4 Требований предусматривает наличие заявления о политике эксплуатирующих организаций в области промышленной безопасности, положения о системе управления промышленной безопасностью, положения о производственном контроле, документов планирования мероприятий по снижению риска аварий, а также иных документов, обеспечивающих

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

функционирование системы [3]. Существенно, что постановление задаёт не шаблоны, а принципы: документация должна соответствовать масштабу и характеру деятельности организации, охватывать все эксплуатируемые объекты, поддерживаться в актуальном состоянии и быть доступной работникам, чьи действия она регулирует, причём формальное наличие папки с документами требования не выполняет — каждая процедура должна реально применяться и оставлять документальные следы применения [4, 8-10].

Именно здесь возникает разрыв между нормативной конструкцией и практикой аудита. Типовая проверка промышленной безопасности, в том числе с применением проверочных листов, ориентирована на вопросы наличия документа и его соответствия пункту нормативного акта [5]. Такая процедура надёжно выявляет отсутствие положения о производственном контроле, но не различает предприятие, где положение работает, и предприятие, где оно существует только в виде файла. Между этими состояниями лежит вся содержательная часть управления риском.

Актуальность задачи подтверждается надзорной статистикой. Итоги 2025 года фиксируют 29 случаев смертельного травматизма на объектах горной промышленности против 51 годом ранее, причём снижение связывается с повышением количества и качества контрольных действий и увеличением числа профилактических мероприятий [6]. Вместе с тем анализ причин происшествий устойчиво указывает на человеческий фактор: за первые восемь месяцев 2026 года в Свердловской и Челябинской областях на объектах горнорудной и нерудной промышленности произошли один групповой несчастный случай со смертельным исходом, две аварии и пять фактов тяжёлого травматизма с семью пострадавшими [7]. Происшествия такого рода возникают не из-за отсутствия документов, а из-за неработающих процессов — управления изменениями, допуска подрядчиков, реагирования на предпосылки.

Практика ведущих компаний отрасли уже сместилась в сторону оценки зрелости. Предприятия разрабатывают собственные системы оценки по ключевым элементам, включая приверженность руководства, мотивацию, обучение и обмен информацией, при этом каждый элемент оценивается по модели кривой Брэдли, что позволяет определить уровень зрелости культуры безопасности [8]. Модель, разработанная компанией DuPont, описывает четыре стадии — реактивную, зависимую, независимую и взаимозависимую — и связывает уровень травматизма с достигнутой стадией [9, 10]. Однако применение этой логики в аудите требует формализации: без расчётных зависимостей оценка зрелости остаётся качественным суждением, не пригодным для аудиторского заключения. Цель работы — разработать методику аудита промышленной безопасности горнодобывающего предприятия, обеспечивающую количественный

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

переход от контроля формального соответствия к оценке зрелости процессов и приоритизации корректирующих мероприятий.

Материалы и методы

Шкала зрелости процессов

В основу методики положена пятиуровневая шкала зрелости, построенная так, чтобы каждый уровень имел наблюдаемые аудиторские признаки, а не только описательную характеристику. Второй уровень соответствует состоянию, при котором формальная проверка даёт положительный результат: документация разработана и утверждена. Все последующие уровни требуют доказательств применения процедуры. Содержание шкалы приведено в таблице 1.

Таблица 1

Шкала уровней зрелости процессов системы управления промышленной безопасностью

Уровень	**Наименование**	**Наблюдаемый аудиторский признак**	**Ii, доли ед.**
1	Реактивный	Процесс не описан, действия предпринимаются после происшествия	0,00
2	Зависимый (формальный)	Документация разработана и утверждена, следы применения единичны	0,25
3	Независимый (регламентный)	Процедура выполняется, записи ведутся, отклонения фиксируются	0,50
4	Управляемый (риск-ориентированный)	Показатели процесса измеряются, решения принимаются по данным риска	0,75
5	Взаимозависимый (оптимизирующий)	Процесс улучшается по результатам анализа, вовлечён линейный персонал	1,00

Примечание: шкала согласована по смыслу с четырьмя стадиями кривой Брэдли [9, 10] с выделением отдельного уровня формального соответствия, выявляемого документарной проверкой.

Расчётные зависимости

Нормированная оценка зрелости отдельного элемента системы приводится к интервалу от нуля до единицы

$$I_i = \frac{L_i - 1}{L_{max} - 1} \quad (1)$$

где Li — присвоенный уровень зрелости i-го элемента; Lmax — максимальный уровень шкалы, принятый равным пяти.

Интегральный индекс зрелости системы управления промышленной безопасностью определяется как взвешенная сумма нормированных оценок элементов

$$M = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot I_i , \ \sum_{i=1}^{n} w_i = 1 \quad (2)$$

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

где wi — весовой коэффициент значимости i-го элемента, доли ед.; n — число элементов системы, принятое равным десяти.

Ключевым диагностическим показателем методики является индекс формализма, отражающий расхождение между результатом документарной проверки и оценкой фактической результативности процессов

$$K_{\text{ф}} = \frac{M_{\text{форм}}}{M_{\text{факт}}} \quad (3)$$

где Мформ — индекс зрелости по результатам проверки наличия и содержания документации; Мфакт — индекс зрелости по результатам оценки применения процедур с проверкой записей и опросом персонала.

Разрыв до целевого состояния по элементу и приоритет корректирующего мероприятия рассчитываются как

$$G_i = L_{\text{цел},i} - L_{\text{факт},i},\ Pi_i = w_i \cdot G_i \quad (4)$$

где Lцел,i — целевой уровень зрелости элемента, устанавливаемый исходя из класса опасности объекта и характера технологического процесса.

Связь зрелости системы с ожидаемой относительной частотой происшествий описывается экспоненциальной зависимостью, отражающей убывающую отдачу при переходе к высоким уровням зрелости

$$\lambda\ (M) = \lambda_0 \cdot \exp\left(- \beta\ \left(M - M_{\text{факт}}\right)\right) \quad (5)$$

где λ0 — относительная частота происшествий при текущем уровне зрелости, принятая за единицу; β — коэффициент чувствительности, принятый равным 1,35 по результатам экспертной калибровки на данных о снижении травматизма при повышении зрелости процессов [6, 8].

Ожидаемое снижение частоты происшествий при реализации комплекса мероприятий и приращение индекса зрелости составляют

$$\Delta\ M = \sum_{i\ =\ 1}^{k} \frac{w_i\left(L_{\text{нов},i} - L_{\text{факт},i}\right)}{L_{max} - 1},\ \eta\ = 1 - \exp(- \beta \cdot \Delta\ M) \quad (6)$$

где k — число элементов, охваченных мероприятиями; Lнов,i — уровень зрелости элемента после реализации мероприятия.

Удельная результативность вложений в развитие элемента и экономический эффект комплекса мероприятий определяются выражениями

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

$$e_i = \frac{\Delta M_i}{C_i} \cdot 100,\ E = U_{\text{ож}} \cdot \tag{7}$$

где Ci — стоимость мероприятия по i-му элементу, млн руб.; Uож — ожидаемый годовой ущерб от аварий и производственного травматизма при текущем уровне зрелости, млн руб.

Срок окупаемости комплекса мероприятий по снижению риска аварий составляет

$$T_{\text{ок}} = \frac{\sum_{i=1}^{k} C_i}{U_{\text{ож}} \cdot \eta} \tag{8}$$

Расчёт выполнен при Lmax = 5, β = 1,35, Uож = 42,0 млн руб./год и весовых коэффициентах, установленных экспертным путём с приоритетом элементов, прямо названных в пункте 4 статьи 11 Федерального закона № 116-ФЗ [1].

Результаты

Оценка выполнена по десяти элементам системы управления промышленной безопасностью условного горнодобывающего предприятия, эксплуатирующего объекты II класса опасности. Для каждого элемента параллельно определены два уровня зрелости: по результатам документарной проверки и по результатам оценки фактического применения процедуры с выборочной проверкой записей и опросом линейного персонала. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты параллельной оценки зрелости элементов системы

Элемент системы	wi	Lформ	Lфакт	Расхожд.	Lцел	Gi	Пi
Политика и лидерство руководства	0,10	3	3	0	4	1	0,10
Идентификация опасностей и оценка риска аварий	0,14	2	2	0	4	2	0,28
Производственный контроль	0,13	3	2	1	4	2	0,26
Управление изменениями	0,09	2	1	1	3	2	0,18
Обучение, аттестация и компетентность	0,10	3	3	0	4	1	0,10
Техническое состояние ОПО и экспертиза ПБ	0,12	3	3	0	4	1	0,12
Готовность к авариям и их локализация	0,09	3	2	1	4	2	0,18
Расследование инцидентов и учёт предпосылок	0,10	2	1	1	4	3	0,30
Управление подрядными организациями	0,08	2	1	1	3	2	0,16
Анализ функционирования СУПБ руководством	0,05	2	2	0	4	2	0,10
Итого / интегральный индекс	1,00	0,385	0,263	0,122	0,708	—	—

Примечание: в итоговой строке приведены значения интегрального индекса зрелости M, рассчитанные по формуле (2); расхождение в итоговой строке равно разности Mформ − Mфакт.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Главный результат состоит в систематическом расхождении двух оценок. Документарная проверка даёт индекс зрелости 0,385 доли ед., что соответствует состоянию между формальным и регламентным уровнями и позволяет считать систему в целом работоспособной. Оценка фактического применения процедур даёт 0,263 доли ед. — практически ровно уровень формального соответствия. Индекс формализма по формуле (3) составляет 1,467, то есть документарный контроль завышает зрелость системы на 46,7 %.

Расхождение локализовано: оно возникает не по всем элементам, а строго по пяти из десяти. Совпадение оценок наблюдается по политике и лидерству, идентификации опасностей, обучению и аттестации, техническому состоянию объектов и анализу функционирования системы — то есть там, где нормативное требование само по себе предполагает документальный след в виде протокола, заключения экспертизы или удостоверения. Расхождение в один уровень зафиксировано по производственному контролю, управлению изменениями, готовности к авариям, расследованию инцидентов и управлению подрядными организациями. Это процессы, результативность которых определяется не наличием документа, а регулярностью действий, и именно они выпадают из поля зрения формальной проверки.

Приоритизация корректирующих мероприятий по формуле (4) и оценка их результативности приведены в таблице 3. Наибольший разрыв до целевого состояния имеет расследование инцидентов и учёт предпосылок: три уровня при весе 0,10, что даёт максимальный приоритет 0,30.

Таблица 3

Приоритетные мероприятия и их удельная результативность

Элемент системы	Lфакт	Lнов	Ci, млн руб.	ΔMi, доли ед.	ei, ед./млн руб.
Расследование инцидентов и учёт предпосылок	1	4	3,6	0,075	2,083
Производственный контроль	2	4	5,5	0,065	1,182
Управление изменениями	1	3	4,2	0,045	1,071
Управление подрядными организациями	1	3	2,8	0,040	1,429
Итого по комплексу	—	—	16,1	0,225	1,398

Примечание: удельная результативность ei рассчитана по формуле (7) и приведена в единицах индекса зрелости на миллион рублей вложений, умноженных на 100.

Ранжирование мероприятий по удельной результативности не совпадает с ранжированием по приоритету разрыва. Постановка учёта предпосылок и расследования инцидентов даёт 2,083 единицы индекса на миллион рублей при стоимости 3,6 млн руб. — это наиболее эффективное вложение, поскольку мероприятие носит преимущественно организационный характер и не требует капитальных затрат.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Управление подрядными организациями обеспечивает 1,429 единицы, управление изменениями — 1,071, а развитие производственного контроля, несмотря на второй по величине приоритет 0,26, показывает лишь 1,182 единицы вследствие высокой стоимости 5,5 млн руб.

Интегральные результаты реализации комплекса мероприятий приведены в таблице 4.

Таблица 4

Интегральная оценка эффекта повышения зрелости системы

Показатель	Обозначение	Значение
Индекс зрелости по документарной проверке	Мформ, доли ед.	0,385
Индекс зрелости по фактическому применению	Мфакт, доли ед.	0,263
Индекс формализма	Кф	1,467
Целевой индекс зрелости	Мцел, доли ед.	0,708
Индекс после реализации комплекса	Мнов, доли ед.	0,488
Приращение индекса	ΔМ, доли ед.	0,225
Стоимость комплекса мероприятий	ΣCi, млн руб.	16,1
Снижение относительной частоты происшествий	η, %	26,2
Снижение при достижении целевого состояния	ηцел, %	45,2
Ожидаемый годовой эффект	Е, млн руб.	11,0
Срок окупаемости комплекса	Ток, лет	1,46

Расчёт по формуле (5) показывает нелинейный характер отдачи. Переход от фактического состояния 0,263 к достигаемому комплексом уровню 0,488 доли ед. снижает ожидаемую относительную частоту происшествий на 26,2 %, тогда как дальнейшее продвижение до целевого уровня 0,708 доли ед. добавляет лишь 19 процентных пунктов, доводя суммарное снижение до 45,2 %. Первые организационные шаги дают наибольший результат на единицу затрат, а приближение к высоким уровням зрелости требует существенно больших вложений при убывающей отдаче. При ожидаемом годовом ущербе 42,0 млн руб. комплекс стоимостью 16,1 млн руб. даёт эффект 11,0 млн руб. в год и окупается за 1,46 года.

Обсуждение

Полученный индекс формализма 1,467 имеет прямое практическое значение для организации аудита. Он означает, что предприятие, безупречно прошедшее документарную проверку, может фактически находиться на уровне формального соответствия, при котором процедуры существуют, но не применяются. Требование постановления № 1243 о том, что документация должна поддерживаться в актуальном

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

состоянии и быть доступной работникам, чьи действия она регулирует, а каждая процедура — оставлять документальные следы применения [4], в этом контексте следует читать как прямое основание для включения в программу аудита тестов применения, а не только тестов наличия. Аудиторская процедура должна строиться по схеме «документ — запись о применении — подтверждение исполнителем», где каждый последующий элемент проверяется выборочно на основе предыдущего.

Локализация расхождения по пяти элементам объясняется различием в механизме образования документального следа. Экспертиза промышленной безопасности технических устройств, аттестация персонала и идентификация опасностей завершаются документом установленной формы, само существование которого доказывает выполнение процедуры. Напротив, управление изменениями, работа с предпосылками и допуск подрядчиков представляют собой непрерывные процессы, в которых отсутствие записи неотличимо от отсутствия события. Именно поэтому в этих областях формальная проверка систематически завышает оценку, и именно они, по данным надзорных органов, лежат в основе происшествий, связанных с человеческим фактором [7].

Результат согласуется с логикой модели кривой Брэдли, в которой зависимая стадия характеризуется соблюдением требований из-за возможных санкций, а независимая и взаимозависимая — принятием личной и коллективной ответственности за безопасность [9, 10]. Предложенная в работе шкала по существу переводит эту качественную типологию в аудиторские признаки: уровень 2 фиксирует наличие правил, уровень 3 — их исполнение, уровень 4 — управление по показателям, уровень 5 — улучшение процесса силами самого персонала. Практика оценки элементов культуры безопасности по такой модели с привязкой показателей безопасности к мотивации руководителей уже применяется на отечественных предприятиях [8], что подтверждает применимость подхода.

Отдельного внимания заслуживает соотношение приоритета и удельной результативности. Формально наибольший разрыв до целевого состояния имеет расследование инцидентов, и оно же оказывается наиболее эффективным вложением. Однако производственный контроль при втором по величине приоритете 0,26 показывает удельную результативность ниже среднего по комплексу. Отсюда следует, что программа корректирующих мероприятий должна формироваться не по разрыву и не по стоимости в отдельности, а по их отношению, при обязательном соблюдении нормативного минимума: производственный контроль является прямым требованием пункта 1 статьи 11 Федерального закона № 116-ФЗ [1] и не может быть исключён из программы по критерию экономической эффективности.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Наблюдаемая на отраслевом уровне динамика подтверждает работоспособность механизма. Снижение числа случаев смертельного травматизма на объектах горной промышленности с 51 до 29 за год связывается непосредственно с увеличением количества и качества контрольных действий и профилактических мероприятий [6], то есть с повышением фактической, а не документарной результативности процессов контроля. Это эмпирический аргумент в пользу коэффициента чувствительности β в формуле (5): изменения в организации контроля дают измеримый отклик в статистике происшествий в пределах одного-двух лет.

Ограничения работы связаны с экспертным происхождением ключевых параметров модели. Весовые коэффициенты wi, целевые уровни Lцел,i, коэффициент чувствительности β и оценка ожидаемого ущерба Uож получены методом экспертного опроса и требуют калибровки по данным конкретного предприятия. Наиболее чувствительным параметром является β: его изменение на 0,2 меняет расчётное снижение частоты происшествий на 3–4 процентных пункта и, соответственно, срок окупаемости на 0,15–0,20 года. Кроме того, присвоение уровня зрелости остаётся оценочной процедурой, поэтому методика требует обязательного документирования аудиторских доказательств по каждому элементу и, при возможности, независимого подтверждения оценок вторым аудитором с расчётом согласованности суждений.

Выводы

1. Разработана методика аудита промышленной безопасности горнодобывающего предприятия, включающая пятиуровневую шкалу зрелости с наблюдаемыми аудиторскими признаками и восемь расчётных зависимостей — от нормированной оценки элемента до срока окупаемости комплекса корректирующих мероприятий.

2. Установлено, что документарная проверка даёт индекс зрелости системы 0,385 доли ед., тогда как оценка фактического применения процедур — 0,263 доли ед.; индекс формализма составляет 1,467, то есть проверка наличия документации завышает зрелость на 46,7 %.

3. Расхождение оценок локализовано по пяти элементам из десяти — производственный контроль, управление изменениями, готовность к авариям, расследование инцидентов и управление подрядными организациями; по элементам, завершающимся документом установленной формы, расхождение отсутствует.

4. Максимальный приоритет корректирующих мероприятий имеет расследование инцидентов и учёт предпосылок (Пi = 0,30 при разрыве в три уровня), максимальную удельную результативность — то же мероприятие с показателем 2,083 единицы индекса на миллион рублей вложений.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

5. Комплекс из четырёх мероприятий стоимостью 16,1 млн руб. повышает индекс зрелости с 0,263 до 0,488 доли ед., снижает ожидаемую относительную частоту происшествий на 26,2 % и окупается за 1,46 года при ожидаемом годовом эффекте 11,0 млн руб.

6. Отдача от повышения зрелости убывает нелинейно: приращение индекса на 0,225 доли ед. даёт снижение частоты происшествий на 26,2 %, а дальнейшее продвижение до целевого уровня 0,708 доли ед. добавляет лишь 19 процентных пунктов.

7. Практическая рекомендация состоит в замене в программе аудита тестов наличия документации тестами применения по схеме «документ — запись о применении — подтверждение исполнителем», в ежегодном расчёте индекса формализма как показателя качества самого аудита и в формировании программы мероприятий по отношению приоритета к стоимости при обязательном соблюдении нормативного минимума.

References

1. Корнева Е. В. Потери добываемого углеводородного сырья в целях применения нулевой налоговой ставки по налогу на добычу полезных ископаемых: правовой аспект // Финансовое право. — 2020. — № 12. — С. 42–46. — DOI: 10.18572/1813-1220-2020-12-42-46.

2. Маринин М. А., Митрофанов С. И., Фомин С. И. Оценка влияния потерь и разубоживания на цепочку затрат: пример золоторудных месторождений // Sustainability. — 2021. — Т. 13. — № 7. — Ст. 3830. — DOI: 10.3390/su13073830.

3. Кисляков В. Е., Дорожкин Д. А., Зубов П. А., Деннер В. И. Обзор эксплуатационных потерь при дражной разработке россыпных месторождений золота // Маркшейдерия и недропользование. — 2022. — № 5 (121). — С. 41–44.

4. Ракышев Б. Р. Полное извлечение кондиционных руд из сложноструктурных блоков за счет частичного примешивания некондиционных руд // Записки Горного института. — 2024. — Т. 270. — С. 919–930. — DOI: 10.31897/PMI.2024.270.8.

5. Имашев А. Ж., Суимбаева А. М., Мусин А. А. Прогнозная оценка разубоживания руды при отработке маломощных крутопадающих залежей системой подэтажных штреков // Записки Горного института. — 2024. — Т. 266. — С. 231–245. — DOI: 10.31897/PMI.2024.266.3.

6. Оценка негативного влияния разубоживания при добыче руды // Горный журнал. — 2020. — № 5. — С. 53–58. — DOI: 10.17580/gzh.2020.05.08.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

7. Алгебраистова Н. К., Прокопьев И. В., Ананенко Е. С., Кинякин А. И. Технологическая оценка реагентных режимов флотации золото-сурьмянистой руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 4. — С. 145–154. — DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_145.

8. Завьялов С. С., Мартынов С. А. Комбинированная технология сухого предварительного обогащения золотосодержащей руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 11-1. — С. 338–345.

9. Чебан А. Ю. Повышение эффективности освоения маломасштабных месторождений путем снижения потерь золота при промывке песков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. — 2025. — Т. 23. — № 4. — С. 5–13. — DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-5-13.

10. Муджалли А. Факторы, влияющие на внедрение риск-ориентированного внутреннего аудита // Journal of Risk and Financial Management. — 2024. — Т. 17. — № 5. — Ст. 196. — DOI: 10.3390/jrfm17050196.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 628.517

Sarkisov A.M., Belov P.S., Belova Y.A., Nikiforov D.Y., Nikiforova O.V., Chorieva A.A. Problems and prospects for using artificial intelligence technologies to assess occupational risks at machine-building enterprises

Проблемы и перспективы применения технологий искусственного интеллекта для оценки профессиональных рисков на машиностроительных предприятиях

Sarkisov Anton Mikhailovich
Student of ETI of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Moscow State Technological University "STANKIN"
Belov Pavel Sergeevich
Associate Professor of the Department of Technology, Equipment, and Automation of Mechanical Engineering Production
ETI of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "STANKIN"
Belova Yulia Andreevna
Student at the ETI of the Moscow State Technical University STANKIN
Nikiforov Denis Yuryevich
Senior Lecturer at the Department of “Technology, Equipment and Automation of Machine-Building Production”
Nikiforova Olga Vladislavovna
Student of the ETI FGBOU VO MSTU "STANKIN"
Chorieva Anastasia Aleksandrovna
Senior Lecturer of the Department of Automated Production Technologies of the ETI of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Moscow State Technological University STANKIN
Саркисов Антон Михайлович
Обучающийся ЕТИ ФГАОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»
Белов Павел Сергеевич
Доцент кафедры «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств»
ЕТИ ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»
Белова Юлия Андреевна
Обучающаяся ЕТИ ФГАОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»
Никифоров Денис Юрьевич
Старший преподаватель кафедры «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств»
Никифорова Ольга Владиславовна
Обучающаяся ЕТИ ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»
Чориева Анастасия Александровна
Старший преподаватель кафедры «Технологий автоматизированного производства»
ЕТИ ФГАОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Abstract. *In the context of the digital transformation of industry, the possibility of using artificial intelligence (AI) technologies to automate the assessment of occupational risks is being actively discussed. However, the question of whether AI can fully replace a labor safety specialist remains open and requires a systematic analysis supported by empirical data.*

The aim of this article is to provide a systematic analysis of the capabilities and limitations of AI in assessing occupational risks at machine-building enterprises, as well as to empirically test the hypothesis that, at the current stage of development, AI is unable to provide a full-fledged replacement for a human expert.

The article provides a systematic review of scientific publications from 2020 to 2026 in the Scopus, Web of Science, eLibrary, and RSCI databases. A pilot experiment was conducted at a mechanical processing site, with parallel risk assessment using the large language model ChatGPT-4o and an expert group. The completeness of hazard identification, the average risk level, and the proportion of high-risk categories were compared.

The literature review revealed systematic limitations of AI – incompleteness in identifying hazards and a tendency to underestimate the risk level, and the pilot experiment confirmed these conclusions – AI identified 17 types of risks compared to 30 identified by experts; the average risk score was 2.88 compared to 3.77, and the share of risks in the high and very high categories was 17.6% compared to 46.7%. Qualitative analysis showed that AI misses hazards associated with informal work organization and rarely implemented but severe scenarios.

At the current stage, AI cannot fully replace a human in assessing professional risks due to fundamental limitations in contextual interpretation, the transparency of decision-making, and the lack of mechanisms for legal liability. A human-centered model has been recognized as optimal, in which AI performs a supporting function, while the final assessment remains with a qualified specialist.

The prospects for expanding the role of AI are linked to the development of explainable artificial intelligence and the formation of an appropriate regulatory and legal framework.

Keywords: *artificial intelligence, occupational risk assessment, mechanical engineering, occupational safety, neural networks, expert systems, large language models, human-centered approach.*

Аннотация. *В условиях цифровой трансформации промышленности активно обсуждается возможность применения технологий искусственного интеллекта (ИИ) для автоматизации оценки профессиональных рисков. Однако вопрос о способности ИИ полностью заменить специалиста по охране труда остаётся открытым и требует системного анализа, подкреплённого эмпирическими данными.*

Целью данной статьи является системный анализ возможностей и ограничений ИИ при оценке профессиональных рисков на машиностроительных предприятиях, а также эмпирическая проверка гипотезы о неспособности ИИ на современном этапе развития обеспечить полноценную замену эксперта-человека.

В статье проведён систематизированный обзор научных публикаций за 2020–2026 гг. в базах Scopus, Web of Science, eLibrary и РИНЦ. Выполнен пилотный эксперимент на участке механической обработки с параллельной оценкой рисков большой языковой моделью ChatGPT-4o и экспертной группой. Сравнивались полнота идентификации опасностей, средний уровень риска и доля высоких категорий риска.

Обзор литературы выявил систематические ограничения ИИ – неполноту идентификации опасностей и тенденцию к занижению уровня риска, а пилотный эксперимент подтвердил эти выводы – ИИ идентифицировал 17 видов рисков против 30, определённых экспертами, средний балл риска составил 2,88 против 3,77, а доля рисков высокой и очень высокой категорий — 17,6% против 46,7%. Качественный анализ показал, что ИИ пропускает опасности, связанные с неформальной организацией труда и редко реализующимися, но тяжёлыми сценариями.

На современном этапе ИИ не может полностью заменить человека при оценке профессиональных рисков ввиду фундаментальных ограничений по контекстной интерпретации, прозрачности принятия решений и отсутствия механизмов юридической ответственности. Оптимальной признана человеко-центрированная модель, в которой ИИ выполняет вспомогательную функцию, а окончательная оценка остаётся за квалифицированным специалистом.

Перспективы расширения роли ИИ связываются с развитием объяснимого искусственного интеллекта и формированием соответствующей нормативно-правовой базы.

Ключевые слова*: искусственный интеллект, оценка профессиональных рисков, машиностроение, охрана труда, нейронные сети, экспертные системы, большие языковые модели, человеко-центрированный подход.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Машиностроение традиционно относится к отраслям с повышенным уровнем производственного травматизма и профессиональных заболеваний. По оценкам Международной организации труда, совокупные экономические потери от неудовлетворительных условий труда в промышленности достигают 4% мирового ВВП, что обусловливает высокую значимость эффективного управления профессиональными рисками. Современная парадигма безопасности труда требует перехода от реактивного подхода к проактивному, основанному на предвидении и предупреждении инцидентов.

Беспрецедентное развитие технологий искусственного интеллекта (ИИ) открывает принципиально новые возможности для автоматизации процессов идентификации опасностей, анализа и прогнозирования профессиональных рисков на машиностроительных предприятиях. Спектр предлагаемых решений варьируется от экспертных чат-ботов на основе больших языковых моделей до адаптивных нейро-нечетких сетей и мультимодальных систем, совмещающих визуальное распознавание опасных ситуаций с нормативным анализом. Тем не менее, вопрос о возможности полноценной замены человека при выполнении оценки профессиональных рисков остается дискуссионным.

Для выявления релевантных работ выполнен систематизированный обзор научных публикаций в базах Scopus, Web of Science, eLibrary и РИНЦ за период 2020–2026 гг. с использованием ключевых слов: «искусственный интеллект», «оценка профессиональных рисков», «машиностроение», «промышленная безопасность», «нейронные сети».

В ряде исследований посвященых применению нейросетевых методов для экспресс-оценки рисков показано, что нейромодели анализа риска демонстрируют характеристики абсолютной и относительной погрешности, сопоставимые с членом экспертного консилиума, а регрессионный анализ обучающей выборки дает существенно худшие результаты по сравнению с нейросетевым подходом.

В Иркутском национальном исследовательском техническом университете С.С. Тимофеевой с соавторами проведено прямое сравнение результатов оценки профессиональных рисков с использованием чат-бота на базе ИИ и экспертной оценки. Установлено, что чат-бот идентифицировал в среднем 10–11 видов рисков, тогда как эксперты выявили 16–17 видов, а средний уровень риска, определенный чат-ботом, оказался практически в 1,5 раза ниже экспертного.

Коллективом Пермского национального исследовательского политехнического университета разработана методология оценки персонифицированного профессионального риска на основе адаптивной нейро-нечеткой сети распознавания

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

образов. Апробация на данных 175 000 параметров условий труда подтвердила высокую прогностическую способность (совпадение с реализовавшимися рисками у 87–89% работников).

В обзоре Li et al. систематизированы достижения, вызовы и будущие направления применения ИИ для обеспечения безопасности в промышленных системах высокого риска. Авторы подчеркивают, что будущая ценность ИИ зависит не только от прогностической эффективности, но и от качества валидации, прозрачности и контролируемого человеком внедрения.

Исследование Müller et al предлагает фреймворк автоматизированной оценки промышленной безопасности, сочетающий генерацию с дополненной выборкой (Retrieval-Augmented Generation, RAG) с мультимодальными большими языковыми моделями. Применительно к коллаборативной роботизированной ячейке достигнуты хорошие показатели обнаружения опасностей, однако подчеркивается, что человеческий контроль сохраняет критическое значение.

Плюсы применения ИИ для оценки профессиональных рисков:

1. Высокая скорость обработки данных

ИИ-системы способны обрабатывать сотни страниц документации и тысячи единиц данных за минуты, что многократно превосходит возможности человека при первичном анализе больших массивов информации;

2. Снижение субъективности и когнитивных искажений

ИИ не подвержен таким когнитивным искажениям, как «ошибка привыкания» и «эффект нормальности», что позволяет выявлять систематические расхождения между нормативными требованиями и фактическим состоянием производственной среды;

3. Прогностические возможности на основе исторических данных

Нейросетевые модели способны аппроксимировать сложные нелинейные зависимости между факторами производственной среды и вероятностью реализации рисков, что обеспечивает более высокую точность прогноза по сравнению с традиционными регрессионными методами.

Минусы и фундаментальные ограничения ИИ:

1. Неполнота идентификации опасностей

Внешние исследования демонстрируют, что чат-бот идентифицирует в 1,76 раза меньше видов рисков по сравнению с экспертами. Это объясняется тем, что ИИ оперирует только той информацией, которая явно содержится в запросе или обучающей выборке, и не способен к самостоятельному выявлению неочевидных опасностей, требующих интуитивного понимания производственного процесса;

2. Занижение уровня риска в условиях неопределенности

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Средний уровень риска, определенный ИИ, оказался в 4,6 раза ниже экспертного, что создает опасность недооценки критических рисков и недостаточности мер управления;

3. «Черный ящик» и непрозрачность

Сложные модели ИИ функционируют как «черный ящик»: специалист получает готовую оценку без возможности проследить цепочку рассуждений, что недопустимо для задач, результаты которых влияют на жизнь и здоровье работников;

4. Неспособность к контекстной интерпретации

ИИ лишен прямого доступа к неформализуемой производственной среде, не может оценить невербальные сигналы, эмоциональное состояние работников, неформальные практики выполнения операций, которые могут содержать ключевую информацию о скрытых рисках;

5. Проблемы валидации и качества данных

Модели ИИ чувствительны к качеству обучающих данных. Ошибки или смещения в данных приводят к ошибочным выводам, а процедуры верификации для систем ИИ в области безопасности труда находятся на начальном этапе;

6. Юридическая ответственность

Возникает принципиальный вопрос о субъекте юридической ответственности за последствия решений, принятых на основе рекомендаций ИИ.

Пилотное эмпирическое сравнение на примере участка машиностроительного предприятия.

Для проведения эмпирических сравнений расчетов человека-эксперта и искусственного интеллекта, на примере участка механической обработки машиностроительного предприятия, с целью проверки проведён пилотный эксперимент. Объектом исследования выбраны участки механической обработки, включающие шесть характерных рабочих мест:

1. Токарный обрабатывающий центр с ЧПУ Doosan Puma 1500;
2. Токарно-винторезный станок 16К20;
3. Токарный станок с ЧПУ СА600С20Ф3;
4. Вертикально-фрезерный станок 6Б75В;
5. Настольно-сверлильный станок ГС2116;
6. Обдирочно-шлифовальный станок Д961/3.

Методика предусматривала:

- составление подробного описания каждого рабочего места с указанием оборудования, оснастки, режущего инструмента, применяемых СОЖ и реальных

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

организационных условий (включая неформальные практики, отклонения от требований инструкций);

- независимую оценку профессиональных рисков двумя способами: с помощью большой языковой модели ChatGPT-4o (запрос формировался по единому шаблону с просьбой перечислить все возможные опасности и присвоить уровень риска по 5-балльной шкале) и силами экспертной комиссии из двух аттестованных специалистов службы охраны труда, предварительно обследовавших участок.

Результаты сравнения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты пилотного эксперимента

Показатель	ИИ (ChatGPT-4o)	Экспертная группа
Общее число идентифицированных видов рисков	17	30
Средний уровень риска (по 5-балльной шкале)	2,88	3,77
Коэффициент конкордации (совпадение перечней)	0,567	–
Доля рисков с уровнем «высокий» и «очень высокий»	17,6%	46,7%

Качественный анализ расхождений показал, что система ИИ систематически пропускала опасности, связанные с:

- неформальными практиками работы, укоренившимися в поведении персонала (удержание заготовки руками при сверлении на ГС2116, проверка размеров на ходу станка на 6Б75В, обход блокировок на Doosan 1500);

- фактическим состоянием защитных устройств (отсутствие или отведение экранов, зазоры у подручников на Д961/3, неисправность местного освещения);

- нештатным складированием легковоспламеняющихся материалов вблизи точила;

- эргономическими перегрузками, возникающими из-за недоступности средств механизации в конце смены (установка тяжёлых заготовок на 16К20);

- недооценкой редко реализующихся, но тяжёлых сценариев (разрыв шлифовального круга, возгорание масляной СОЖ).

Эксперты, напротив, учитывали прецеденты и фактическую организацию труда, что и обусловило выявление более широкого спектра опасностей и присвоение более высоких категорий риска. Результаты согласуются с данными работы и подтверждают, что на текущем этапе ИИ демонстрирует как неполноту идентификации опасностей, так и тенденцию к занижению уровня риска в условиях неполноты и неформализованности исходных данных.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Задаваясь вопросом почему ИИ не может заменить человека на современном этапе, следует учитывать принципиальные различия между искусственным интеллектом и человеком-экспертом в таблице 2.

Таблица 2

Сравнительный анализ возможностей ИИ и человека-эксперта

Критерий	Искусственный интеллект	Человек-эксперт
Полнота идентификации рисков	Выявляет ограниченный перечень опасностей 17 против 30)	Выявляет более широкий спектр опасностей
Точность оценки уровня риска	Тенденция к занижению уровня риска (средний балл 2,88 против 3,77)	Более адекватная оценка тяжести риска
Контекстная чувствительность	Не способен улавливать неявные факторы риска	Учитывает организационную культуру и неформальные практики
Интерпретируемость	Результат выдается без обоснования («черный ящик»)	Эксперт может аргументировать каждое решение
Юридическая ответственность	Не определена	Четко установлена законодательством
Работа в нестандартных ситуациях	Ограничена рамками обучающей выборки	Способность к креативным решениям
Производительность при больших данных	Высокая скорость и масштабируемость	Ограничена физиологическими возможностями
Подверженность когнитивным искажениям	Свободен от искажений	Подвержен эффектам привыкания и усталости

Представленное сравнение демонстрирует, что преимущества ИИ и человека лежат в принципиально разных плоскостях - ИИ эффективен в задачах быстрого анализа больших массивов данных, но уступает в контекстной интерпретации, полноте идентификации рисков и обосновании принимаемых решений.

Проведенный анализ позволяет сформулировать следующие выводы:

Технологии ИИ обладают значительным потенциалом для повышения эффективности оценки профессиональных рисков на машиностроительных предприятиях, особенно в задачах прогнозирования, обработки больших массивов данных и снижения влияния человеческого фактора.

Результаты исследований показывают, что на современном этапе ИИ-системы демонстрируют систематические ограничения: неполноту идентификации опасностей, тенденцию к занижению уровня риска, отсутствие прозрачности и контекстной чувствительности.

Полноценная замена человека-эксперта в процессе оценки профессиональных рисков в настоящее время невозможна в силу фундаментальных различий в природе человеческого и машинного интеллекта, а также нерешенности вопросов юридической ответственности.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Оптимальной стратегией является человеко-центрированная модель, в которой ИИ выступает в качестве инструмента поддержки принятия решений, а окончательная оценка и ответственность за нее сохраняется за квалифицированным специалистом.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются разработка методологии валидации ИИ-систем в области безопасности труда, создание интерпретируемых моделей, а также формирование нормативно-правовой базы, регулирующей применение ИИ при оценке профессиональных рисков.

References

1. Тимофеева С.С., Касимов И.Р., Али Е.Б. Применение искусственного интеллекта в оценке профессиональных рисков золотоизвлекательной фабрики // Управление техносферой: электрон. журнал. — 2025. — Т. 8. — Вып. 4. — С. 753–768. DOI: 10.35634/UdSU.2025.71.76.013.

2. Зайцева Н.В., Савочкина А.А., Землянова М.А., Горяев Д.В., Фадеев А.Г. Методология оценки и прогнозирования персонифицированного профессионального риска для здоровья на основе адаптивной нейро-нечеткой сети распознавания образов // Анализ риска здоровью. — 2025. — № 2. — С. 4–15. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.01.

3. Generative AI-based risk assessment and hazard identification towards safety compliant workplace design // CIRP Annals. — 2026. — Vol. 75, Article Dn5. DOI: 10.1016/j.cirp.2026.03.015.

4. Российские ученые разработали программу для оценки индивидуальных профессиональных рисков здоровью на производствах // CNews. — 2025. — 24 декабря. — URL: https://www.cnews.ru/news/line/2025-12-24_rossijskie_uchenye_razrabotali (дата обращения: 04.05.2026).

5. Общество и экономика в цифровую эпоху: отраслевые трансформации и прикладные цифровые практики : Монография / В. Ю. Асташова, И. А. Баляев, П. С. Белов [и др.]. – Санкт-Петербург : Гуманитарный национальный исследовательский институт НАЦРАЗВИТИЕ, 2026. – 118 с. – ISBN 978-5-00213-496-0. – DOI 10.37539/M260411.2026.53.93.001. – EDN VNISAQ.

6. Эволюция и совершенствование методологических подходов в научных исследованиях в эпоху цифровых технологий / М. У. Базарова, П. С. Белов, В. В. Бондарь [и др.]. – Нижний Новгород : Профессиональная наука, 2025. – 193 с. – ISBN 978-5-908003-16-2. – EDN WMAQCM.

7. Инновационные подходы в управлении профессиональными рисками на машиностроительных предприятиях: российский и международный опыт / А. М. Саркисов, П. С. Белов, Ю. А. Белова [и др.] // International Journal of Professional Science. – 2026. – № 1-2. – С. 66-71. – EDN FDWUVJ.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 004.896

Zmirskas F.S. Predictive analytics and technical audits as factors in reducing downtime at pulp and paper industry enterprises

Предиктивная аналитика и технический аудит как факторы снижения простоев на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности

Zmirskas Filipp Sergeyevich,
Master's student, Department of Economics and Organization of Production, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Higher School of Technology and Energy

Nikiforova Vera Dmitrievna
Professor, Department of Economics and Organization of Production, Doctor of Economic Sciences, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Higher School of Technology and Energy

Змирскас Филипп Сергеевич,
Магистрант кафедры Экономики и организации производства,
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна.
Высшая школа технологии и энергетики

Никифорова Вера Дмитриевна
Профессор кафедры Экономики и организации производства,
доктор экономических наук,
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна.
Высшая школа технологии и энергетики

Abstract. *This article examines the role of predictive analytics and technical audits in reducing equipment downtime at pulp and paper industry enterprises. Using the operations of the engineering company TsBP-Service LLC as a case study, the authors analyze modern diagnostic methods for paper machines employing high-precision instruments (such as FiberScan, strain gauges, and thermal imagers). The study demonstrates that implementing a predictive maintenance system can reduce equipment restoration time (MTTR) by 30–40% and cut warranty-related costs by 25%. Key barriers to adopting these innovative diagnostic methods are identified, including organizational and psychological factors such as resistance from client-company personnel. Recommendations for overcoming these obstacles are also proposed.*

Keywords: *predictive analytics, technical audit, pulp and paper industry, paper machines, Industry 4.0, downtime reduction, MTTR, equipment diagnostics.*

Аннотация. *В статье рассматривается роль предиктивной аналитики и технического аудита в снижении простоев оборудования на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП). На примере деятельности инжиниринговой компании ООО «ЦБП-Сервис» проанализированы современные методы диагностики бумагоделательных машин с использованием высокоточных приборов (FaiberScan, тензометры, тепловизоры). Показано, что внедрение системы предиктивного обслуживания позволяет сократить время восстановления работоспособности оборудования (MTTR) на 30–40% и снизить гарантийные расходы на 25%. Выявлены основные барьеры внедрения инновационных методов диагностики, включая организационно-психологические факторы сопротивления со стороны персонала предприятий-клиентов. Предложены рекомендации по преодолению выявленных ограничений.*

Ключевые слова: *предиктивная аналитика, технический аудит, целлюлозно-бумажная промышленность, бумагоделательные машины, Industry 4.0, снижение простоев, MTTR, диагностика оборудования.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Целлюлозно-бумажная промышленность (ЦБП) относится к числу капиталоемких отраслей, где стоимость простоев оборудования достигает критических значений. Остановки бумагоделательных машин (БДМ) даже на несколько часов приводят к убыткам, исчисляемым миллионами рублей, из-за нарушения непрерывности технологического цикла, порчи сырья и срыва обязательств перед клиентами. В этих условиях традиционная система планово-предупредительных ремонтов (ППР), основанная на регламентных интервалах обслуживания, демонстрирует свою недостаточную эффективность. Переход к концепции Industry 4.0 и цифровая трансформация промышленности открывают новые возможности для повышения надежности оборудования за счет внедрения предиктивной аналитики — метода прогнозирования отказов на основе непрерывного мониторинга параметров работы машин и анализа данных в реальном времени. Однако степень внедрения этих технологий в российской ЦБП остается низкой: по оценкам отраслевых экспертов, не более 30% предприятий используют комплексный технический аудит с применением высокоточных диагностических приборов.

Эволюция подходов к техническому обслуживанию промышленного оборудования прошла несколько этапов. До 1950-х годов доминировало реактивное обслуживание, предполагавшее ремонт после отказа, что характеризовалось высокими затратами на аварийные остановки и длительными простоями. В период с 1950-х по 1990-е годы получила распространение система планово-предупредительных ремонтов (ППР), основанная на обслуживании по регламенту через фиксированные интервалы времени. Данный подход снижал частоту аварийных отказов, но приводил к избыточному обслуживанию и не предотвращал все виды поломок. В 1990–2010-е годы произошло внедрение обслуживания по состоянию, предполагавшего мониторинг параметров оборудования и принятие решений о ремонте на основе фактического технического состояния, что требовало внедрения систем диагностики.

С 2010-х годов началось развитие предиктивного обслуживания, основанного на прогнозировании отказов с использованием анализа данных, машинного обучения и непрерывного мониторинга. Этот подход позволяет оптимизировать интервалы обслуживания и предотвращать аварии до их возникновения. Предиктивная аналитика в контексте ЦБП представляет собой комплекс методов, включающих непрерывный мониторинг вибрации, температуры, влажности, натяжения элементов БДМ, анализ трендов изменения параметров во времени, использование алгоритмов машинного обучения для выявления паттернов, предшествующих отказам, а также интеграцию данных из различных источников (датчики, системы SCADA, результаты ручных измерений).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Исследование основано на анализе практического опыта инжиниринговой компании ООО «ЦБП-Сервис», специализирующейся на поставках оборудования и сервисном обслуживании предприятий ЦБП. Методологическую базу составили анализ финансово-хозяйственной деятельности компании за 2023–2024 гг., изучение технологической документации и методик технического аудита, экспертные интервью с инженерами сервисной службы, сравнительный анализ показателей простоев оборудования до и после внедрения предиктивной диагностики, а также анализ отзывов клиентов (целлюлозно-бумажных комбинатов).

В 2023–2024 гг. ООО «ЦБП-Сервис» внедрило комплексную систему технического аудита бумагоделательных машин на базе высокоточного диагностического оборудования. Ключевые компоненты системы представлены в таблице 1.

Таблица 1

Инструментарий предиктивной диагностики ООО «ЦБП-Сервис»

Прибор	Назначение	Измеряемые параметры	Практическое применение
FaiberScan (Feltest)	Замер массы воды на формующей сетке	Сверхвысокочастотные колебания, влажность бумажной массы	Оптимизация процесса формования полотна, снижение энергозатрат на обезвоживание
Тензометр Tensio pro	Контроль натяжения сеток и сукон	Сила натяжения, деформация элементов	Предотвращение обрывов полотна, оптимизация скорости машины
Стробоскоп	Оценка турбулентности бумажной массы	Частота пульсации, равномерность потока	Выявление зон турбулентности, улучшение качества полотна
Swema 3000 (тепловизор/гигрометр)	Измерение температуры сушильных цилиндров	Температура поверхности, точка росы, влажность воздуха	Оптимизация режима сушки, предотвращение конденсации

Ключевым инструментом системы стал прибор FaiberScan (Feltest), представляющий собой сверхвысокочастотный прибор для замера массы воды на формующей сетке. Данный прибор измеряет сверхвысокочастотные колебания и влажность бумажной массы, что позволяет оптимизировать процесс формования полотна и снизить энергозатраты на обезвоживание.

Вместе с тем для контроля натяжения сеток и сукон, что критически важно для предотвращения обрывов полотна, компания применяет тензометр Tensio pro. Этот

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

прибор измеряет силу натяжения и деформацию элементов, обеспечивая оптимизацию скорости машины. Для оценки турбулентности бумажной массы в реальном времени используется стробоскоп, позволяющий выявлять зоны турбулентности и улучшать качество полотна. Кроме того, тепловизор и гигрометр Swema 3000 применяется для измерения температуры сушильных цилиндров, точки росы и влажности воздуха, что обеспечивает оптимизацию режима сушки и предотвращение конденсации.

Внедрение системы предиктивной диагностики позволило достичь значительных экономических и операционных результатов. Прежде всего, было достигнуто снижение гарантийных расходов на 25%. До внедрения технического аудита компания несла значительные затраты на гарантийное обслуживание оборудования, поставленного клиентам. Анализ показал, что до 40% гарантийных случаев были связаны не с браком оборудования, а с некорректной эксплуатацией или несвоевременным выявлением проблем на этапе пусконаладки. Предвыездная диагностика с использованием высокоточных приборов позволяет выявить потенциальные проблемы до начала эксплуатации, сформировать точную смету необходимых работ, иметь на складе нужные запчасти до выезда инженера и документировать исходное состояние оборудования для обоснования гарантийных случаев.

Важным достижением стало сокращение времени простоя оборудования клиентов (MTTR) на 30–40%. Показатель MTTR (Mean Time To Repair — среднее время восстановления работоспособности) является ключевым индикатором эффективности сервисного обслуживания. До внедрения предиктивной диагностики средний MTTR составлял 8–12 часов при типовых отказах. После внедрения системы этот показатель снизился до 5–7 часов. Данный эффект достигается за счет точной предварительной диагностики проблемы, когда инженер приезжает с пониманием причины отказа, наличия необходимых запчастей и инструментов, что исключает повторные выезды, а также оптимизации последовательности ремонтных работ на основе данных диагностики. Сравнительные показатели эффективности внедрения предиктивной диагностики на предприятиях ЦБП представлены на Рисунке 1.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

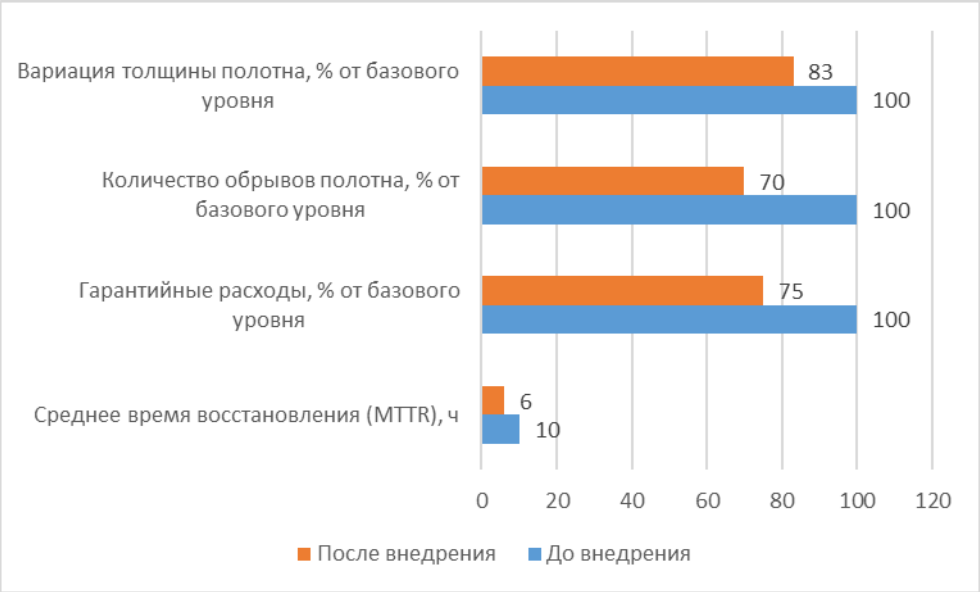


Рисунок 1. Сравнительные показатели эффективности внедрения предиктивной диагностики на предприятиях ЦБП (на примере ООО «ЦБП-Сервис», 2023–2024 гг.)

Внедрение предиктивной диагностики также способствует повышению качества бумажного полотна, что выражается в снижении вариации его толщины на 15–20% и уменьшении количества обрывов сетки на 25–30%. Показательным примером эффективности данного подхода служит оптимизация вакуумной системы на одном из комбинатов, где переход от регламентной замены валов к обслуживанию по фактическому состоянию на основе данных тензометрии позволил сократить затраты на 35% при одновременном росте надежности оборудования.

Несмотря на доказанную эффективность, массовое внедрение предиктивной аналитики в российской целлюлозно-бумажной промышленности сдерживается комплексом системных барьеров. Ключевым препятствием выступает организационно-психологическое сопротивление: около 40% предприятий не доверяют внешнему аудиту из-за опасений утечки коммерческой тайны, консерватизма руководства и нежелания персонала признавать превосходство внешних экспертов. Ситуация усугубляется финансово-инвестиционными ограничениями, поскольку высокая стоимость диагностического оборудования и дорогое кредитование делают такие проекты труднодоступными для среднего бизнеса. Дополнительным фактором риска является острый кадровый дефицит инженеров-диагностов и сохраняющийся разрыв между научными разработками профильных вузов и реальными потребностями производства.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Для преодоления указанных ограничений предлагается поэтапная стратегия, начинающаяся с запуска пилотных проектов на лояльных площадках и вовлечения персонала клиентов в совместные измерения для формирования доверия. Параллельно необходимо развивать кадровый потенциал через партнерство с профильными университетами и институционализировать открытые инновации. Таким образом, переход к предиктивному обслуживанию, позволяющий сократить время простоя на 30–40% и гарантийные расходы на 25%, представляет собой не просто технологическую модернизацию, а стратегическую трансформацию, требующую изменения корпоративной культуры и глубокой интеграции науки с производством для обеспечения долгосрочной конкурентоспособности отрасли.

References

1. Александров А.В., Гаузе А.А., Гончаров В.Н. Оборудование ЦБП. Часть II. Бумагоделательные машины: учебное пособие. – Санкт-Петербург: СПбГУПТД, 2018. – 310 с.

Баймурзина Г.К. Разработка критериев и показателей эффективности бизнес-процессов по техническому обслуживанию и ремонту промышленного оборудования // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2026. – № 1. – С. 12-19.

2. Ершов А.Н. Актуальные проблемы развития предиктивной аналитики на предприятиях промышленности с учетом специфики внедрения // Вестник технологического университета. – 2025. – Т. 28, № 2. – С. 45-52.

3. Измайлов М.К. Интеграция информационных технологий в процессы эксплуатации и обслуживания основных средств: оценка зрелости предиктивной аналитики // Автоматизация в промышленности. – 2025. – № 3. – С. 22-28.

4. Инновационные решения в развитии целлюлозно-бумажной промышленности: сборник научных трудов / под ред. В.Д. Никифоровой. – Санкт-Петербург: СПбГУПТД, 2024. – 185 с.

5. Предиктивная аналитика в практике эксплуатации механического оборудования // Главный инженер. Управление промышленным производством. – 2024. – № 11. – С. 15-20.

6. Решение проблемы виброзащиты и вибродиагностики бумагоделательного и лесопильного оборудования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2022. – 24 с.

7. Технический аудит и диагностика бумагоделательных машин: практическое руководство для инженеров ЦБП // Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2024. – № 4. – С. 34-39.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

8. Data Track. Промышленная аналитика и мониторинг: расчет KPI OEE, MTBF, MTTR и предиктивная аналитика отказов оборудования [Электронный ресурс]. – URL: https://www.data-track.ru/ (дата обращения: 22.09.2026).

9. Digital Design. Предиктивные ремонты оборудования: переход к Индустрии 4.0 для снижения простоев [Электронный ресурс]. – URL: https://digdes.ru/nlab/prediktivnye-remonty-oborudovaniya (дата обращения: 22.09.2026).

10. Hannecard. Специализированные услуги для целлюлозно-бумажной промышленности: технический аудит БДМ и диагностика [Электронный ресурс]. – URL: https://www.hannecard.ru (дата обращения: 22.09.2026).

11. Предиктивное обслуживание в целлюлозно-бумажной промышленности: переход от плановых ремонтов к диагностике по состоянию [Электронный ресурс] // Diagnost.ru. – 2023. – URL: https://diagnost.ru/articles/prediktivnaya-diagnostika-v-tsellyulozno-bumazhnoy-promyshlennosti/ (дата обращения: 22.09.2026).

12. Шваб К. Четвертая промышленная революция: пер. с англ. – 2-е изд. – Москва: Эксмо, 2024. – 240 с. – ISBN 978-5-04-180321-7.

13. Кузнецов А.В., Петров С.И. Цифровая трансформация промышленных предприятий: от концепции Industry 4.0 к практическому внедрению // Промышленное производство и управление. – 2025. – № 2. – С. 15-22.

14. Надежность и диагностика промышленного оборудования: учебник / под ред. В.И. Сидорова. – Москва: Машиностроение, 2024. – 420 с. – ISBN 978-5-217-20145-8.

15. Соколов Д.М. Организационные барьеры внедрения инноваций в традиционных отраслях промышленности: опыт целлюлозно-бумажного сектора // Управление инновациями. – 2025. – № 1. – С. 33-40.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

PHYSICAL SCIENCES

UDC 519.246:53.087.4:535.15:621.37

Anikyev A.A., Sitnikov M.A. Optical layout of the imaging objective within a laboratory spectrometer

Оптическая схема изображающего объектива в составе лабораторного спектрометра

Anikiev Anatoly Anatolyevich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department RL2
Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow
Sitnikov Maxim Alexandrovich
Research Engineer, Department of Thematic Studies and Design of Earth Remote Sensing Systems,
PJSC N.A. Zverev Krasnogorsk Mechanical Plant, Krasnogorsk, Moscow Region
Аникьев Анатолий Анатольевич
Доктор физико-математических наук, профессор кафедры РЛ2
ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
Ситников Максим Александрович
инженер – исследователь, Отдел тематических исследований и проектирования систем дистанционного зондирования Земли, ПАО Красногорский механический завод им. Н.А. Зверева, г. Красногорск, Московская область

Abstract. *The optimization of the optical design for a high-aperture imaging objective intended for use in a laboratory spectrometer is proposed and carried out. Two versions of the objective's optical design were developed: one incorporating aspheric surfaces on two elements and another without such surfaces. Optimizing both versions significantly improved their optical characteristics and reduced the system's primary aberrations. The proposed design – which avoids the use of aspheric surfaces on two optical elements – is considerably easier to manufacture while maintaining key optical parameters, such as spot size and energy concentration within the spot, at a sufficiently high level. The resulting spectrometer characteristics, combined with the quality of the imaging objective, fully met the requirements for high-resolution spectral recording in the 0.4–1.0 μm range.*

Keywords: *high-aperture imaging objective, Rusinov objective, aberration and dimensional analysis.*

Аннотация. *Предложена и проведена оптимизация оптической схемы светосильного изображающего объектива в составе лабораторного спектрометра. Оптическая схема объектива была разработана в двух вариантах – предварительно с применением асферических поверхностей на двух элементах и без использования таких поверхностей. Оптимизация обеих вариантов оптической схемы объектива позволила существенно улучшить их оптические характеристики и уменьшить основные аберрации системы. Предложенная схема объектива без использования асферических поверхностей на двух оптических элементах существенно более технологична в изготовлении и позволяет сохранить основные оптические параметры, такие как размеры пятна рассеяния и концентрацию энергии в пятне на достаточно хорошем уровне. Полученные характеристики спектрометра в совокупности с качеством изображающего объектива позволили полностью удовлетворить необходимым параметрам регистрации спектров в спектральном диапазоне 0,4 – 1,0 мкм с высоким разрешением.*

Ключевые слова: *изображающий светосильный объектив, объектив Русинова, аберрационный и габаритный расчет.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Введение

При выполнении различного рода задач анализа земной атмосферы или дистанционного зондирования Земли со спутника в целях картографирования земной поверхности необходима предварительная постановка лабораторных экспериментов по разработке и тестированию оптических компонентов, спектральных приборов и оптико-электронных комплексов [1-4]. Оснащение орбитальных комплексов оптическими системами спектрального анализа и наблюдения обычно основано на использовании приемного двух или трехзеркального телескопического объектива в составе с инфракркасным фурье – спектрометром [5-8]. Съемка местности на небольших высотах с борта самолета, вертолета или наземная в случае сильно пересеченного ландшафта требует использования широкоугольного короткофокусного объектива, обладающего высокой глубиной резкости.

В настоящей работе проведен анализ и оптимизация короткофокусного изображающего объектива, обеспечивающего в составе со спектрометром проводить мультиспектральную съемку местности в диапазоне длин волн 0,4 – 1 мкм на небольших высотах с высоким разрешением.

Теоретическая часть.

Расчет объектива будем проводить по методу синтеза Русинова [9 - 11]. Такой метод состоит в сочетании телеконцентрической афокальной системы и положительной линзы с апланатической поверхностью. В этом случае полученная система позволяет устранить астигматизм, кому и сферические аберрации.

Структурная схема, состоящая из компонентов 1и 2, образующих телескопическую афокальную систему и фокусирующего элемента 3 показана на рисунке 1.

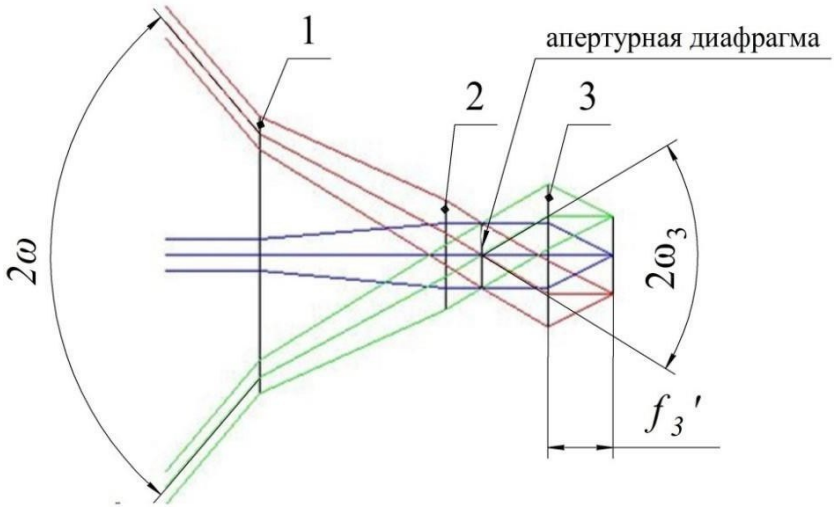


Рис. 1. Структурная схема объектива, построенного по методу Русинова.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

В передней фокальной плоскости фокусирующего элемента 3 расположена апертурная диафрагма.

Синтез оптической схемы изображающего объектива

В качестве исходных параметров для расчета были выбраны значения, приведенные в таблице 1.

Таблица 1

Параметры для расчета объектива

Входной зрачок	6 мм
Спектральный диапазон	0.4-1.0 мкм
Угловое поле 2w	34 градусов
Фокусное расстояние	20 мм

Синтез изображающего объектива в его первоначальном виде был проведен в программе ZEMAX. В процессе оптимизации, согласно габаритному расчету, был уменьшен входной зрачок, а также заменены материалы линз, что позволило добиться меньших значений аберраций системы. На рисунке 2 показан ход лучей в оптической системе после проведения оптимизации.

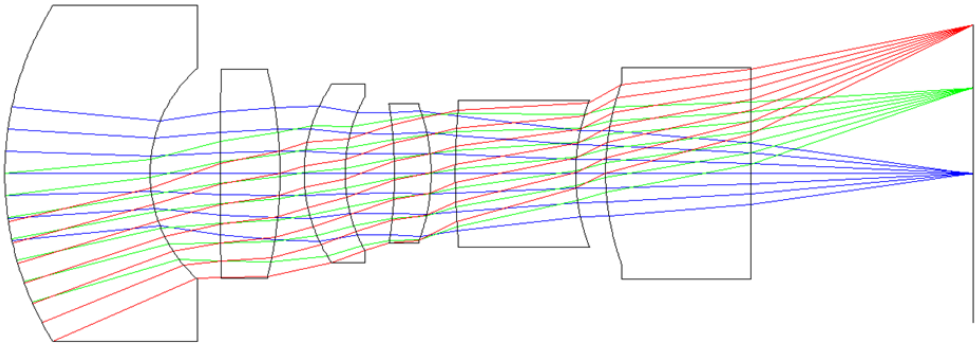


Рис. 2. Оптическая схема широкоугольного объектива с угловым полем 34^0.

Дальнейшая оптимизация полученного объектива проводилась на основе достижения лучших показателей технологической сборки и юстировки системы. Для этого отдельные линзы в схеме рисунка 2 были заменены на склейки и после нескольких этапов оптимизации удалось добиться хорошего показателя передачи контраста. Кроме того, были исправлены хроматизм, дисторсия, а также кривизна поля в пространстве изображений. В таблице 2 приведены значения основных аберраций, а на рисунке 3 показана оптическая схема полученного объектива с ходом лучей.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Таблица 2.

Параметр	Значение
1. Продольная сферическая аберрация	-0.036 мм
2. поперечная сферическая аберрация	5.4 мкм
3. Дисторсия	0.16%
4. Астигматизм	-0.026 мм
5. Меридиональная кома	3.15 мкм
6. Хроматизм положения	-0.051 мм
7. Хроматизм увеличения	-0.015 мкм
8. Сферохроматизм	0.0027 мм

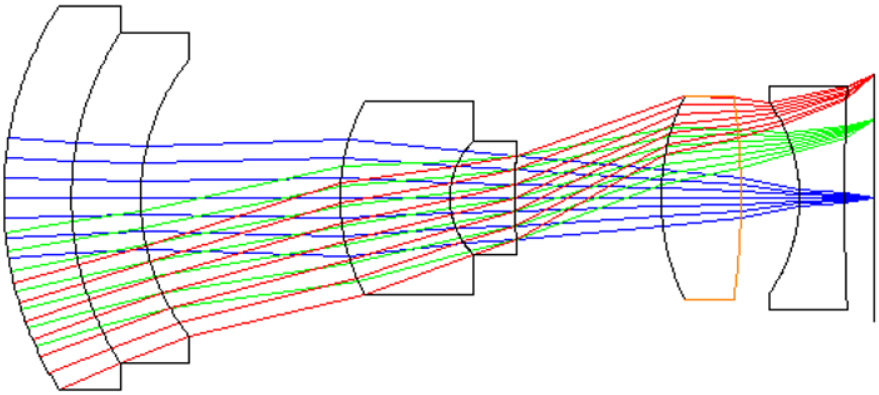


Рис. 3. Оптическая схем полученного объектива после оптимизации.

Качественная оценка изображения, сформированного на плоскости приемной матрицы дается графиком распределения энергии в пикселе. Функция рассеяния в дифракционном пятне показана на рисунке 4. В полученной нами системе пятно рассеяния вписывается не в один пиксель, а в два и по форме оказывается искаженным (размеры пикселя приемной матрицы 5*5 мкм). Один из возможных путей уменьшения пятна рассеяния до дифракционных пределов в нашем случае было бы использование асферической поверхности у линзы Смита (шестой элемент оптической схемы). Однако это привело бы к существенному технологическому усложнению изготовления объектива. В то же время разработанная оптическая схема со сферическими поверхностями линз вполне соответствует заданным параметрам съемки местности при разработке отвечающей ей схеме спектрометра [12-15].

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

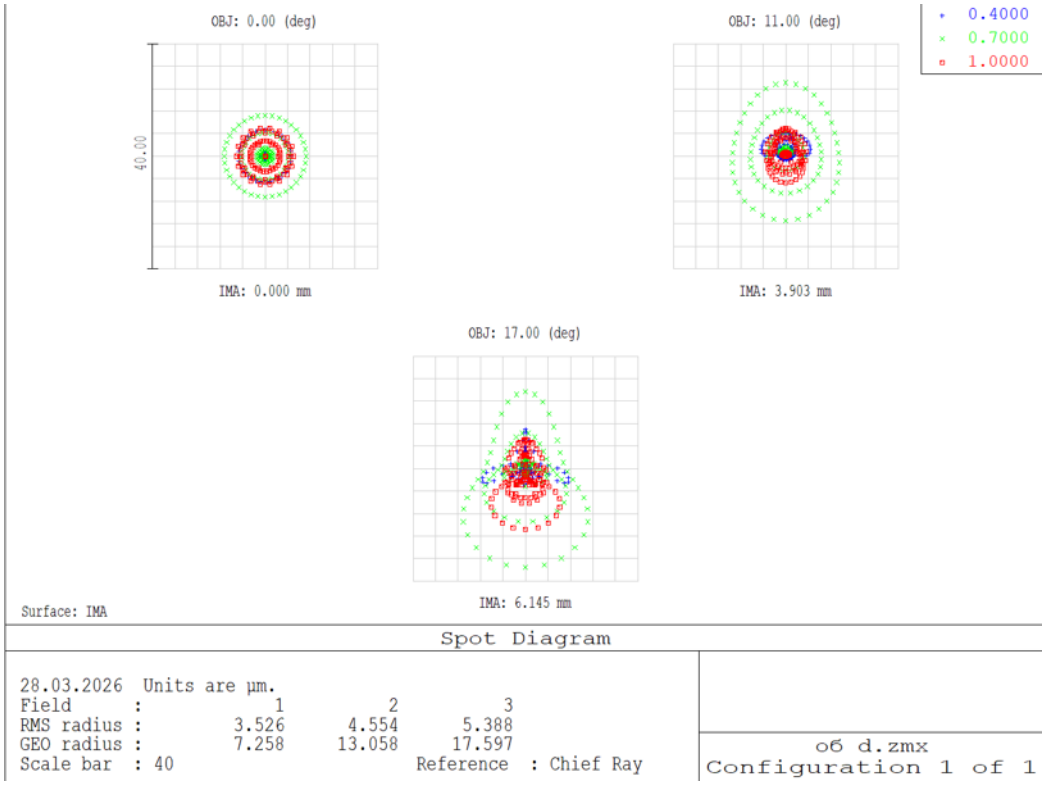


Рис. 4. Диаграмма пятна рассеяния изображающего объектива, приведенного на рисунке 3.

Заключение

В результате анализа оптических схем и синтеза объектива по методу Русинова был разработан короткофокусный изображающий объектив с хорошим качеством изображения и малыми аберрациями. Объектив в составе со спектрометром представляет собой систему мультиспектральной съемки местности как с борта летательного аппарата, так и при наземной экспедиции с борта транспортного средства при работе в горной и сильно пересеченной местности.

References

1. Беляев Б. И., Катковский Л. В., Сосенко В. А., Беляев Ю.Б. Наземные и полетные калибровки авиакосмической аппаратуры дистанционного зондирования Земли //Наука и инновации. 2016, №4 (158). С. 21–25.

2. Расторгуев, А.А. Моделирование распределения освещённости в плоскости регистратора космического гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера /А.А. Расторгуев, С.И. Харитонов, Н.Л. Казанский. Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 3. – С. 399-405. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-399-405.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

3. Расторгуев, А.А. Моделирование допустимых погрешностей расположения оптических элементов для космического гиперспектрометра, проектируемого по схеме Оффнера / А.А. Расторгуев, С.И. Харитонов, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 3. – С. 424-431. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-424-431.

4. Кириченко Д.В., Глущенко А.А., Маслов К.К., Упитис К. И. Моделирующий стенд для испытаний бортовых ОЭС МКА с использованием средств имитации фоноцелевой обстановки. ИЗВ. ВУЗОВ. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ. 2009. Т. 52, № 4, с. 78-81.

5. Владимиров В.М., Юксеев В.А., Лапухин Е.Г. Оптическая система для дистанционного зондирования в УФ-, видимом и ближнем ИК диапазонах. Компьютерная оптика, 2020, т. 44, №2 с. 195 – 203. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-611.

6. Гарбук С. В., Гершензон В. Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. — М.: Изд-во А и Б, 1997. — 296 с.

7. Кашкин В. Б., Сухинин А. И. Дистанционное зондирование Земли из космоса: цифровая обработка изображений. — М.: Логос, 2001. — 264 с.

8. Чандра А. М., Гош С. К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. М.: Техносфера, 2008. 312 с.

9. Русинов М.М. Композиция оптических систем- Ленинград. Машиностроение. Ленинградское отделение. 1989. – 383 с.

10. Михельсон, Н.Н. Оптика астрономических телескопов и методы расчета / Н.Н. Михельсон. – М: Физматлит, 1995. – 333 с.

11. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов: Физика, оптика. Л.: Машиностроение, 1975. 312 с.

12. Головин, А. Д., Дёмин А. В. Имитационная модель многоканального гиперспектрометра Оффнера //Компьютерная оптика. 2015. Т. 39, № 4. С. 521—528.

13. Горбунов Г. Г., Демин А. В., Никифоров В. О., Савицкий А. М., Скворцов Ю. С., Сокольский М. Н., Трегуб В. П. Гиперспектральная аппаратура для дистанционного зондирования Земли // Оптич. журн. 2009. Т. 76, № 10. С. 75—82.

14. Головин, А. Д., Дёмин А. В. Малогабаритный гиперспектрометр видимого и ближнего инфракрасного диапазонов. ИЗВ. ВУЗОВ. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ. 2015. Т. 58, № 11. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-11-869-873.

15. Prieto-Blanco X. González-Nuñez H, de la Fuent R. Off-plane anastigmatic imaging in Offner spectrometers. // Journal of the Optical Society of America – 2011. – Vol. 28, Issue 11. – P. 2332-2339.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

REVIEWS AND ANALYSIS

UDC 34:004:34.096:347.211:004.8

Rechkina M.S., Kasatkin D.M. Liability for the Generation of Malicious Code: Delineating Responsibility Between the AI Model Creator and the User Who Circumvented Its Restrictions

Rechkina Maria Sergeevna,
student, of the Department of Legal Regulation of Urban Planning and Transport,
Russia, Saint Petersburg
Kasatkin Dmitry Mikhailovich
Senior Lecturer
Department of Legal Regulation of Urban Planning and Transport Activities, Faculty of Forensic Expertise and Law in Construction and Transport, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

Abstarct. *The presented article analyzes the problem of distributing legal liability when generating malicious software using neural network algorithms. Special attention is paid to the complex aspect of delineating guilt between the direct developer of the artificial intelligence architecture and the end user who intentionally bypassed built-in restrictions and security filters. Amid the constant growth in the number of cyber incidents involving autonomous systems [5, p. 818], there is an urgent need to determine the exact legal status of objects generated by neural networks, as well as to establish transparent criteria for the culpability of the involved parties. The text examines in detail the existing legal mechanisms for distributing responsibility for harm caused by intellectual programs [2, p. 45]. A concept is evaluated according to which the purposeful use of vulnerabilities (the so-called jailbreak) to remove basic prohibitions shifts the main burden of compensation for damages exclusively to the user [7, p. 14]. At the same time, precedent situations are investigated where the circumvention of protective mechanisms becomes possible due to the critical negligence of the creator during the neural network training stage. In essence, classical approaches to tort law currently face a fundamental challenge, forming a pronounced "liability gap" in artificial intelligence law [5, p. 820]. Ultimately, the effective resolution of such conflicts requires a deep adaptation of existing legal models to the specifics of the functioning and creation of complex digital objects [10, p. 55].*

Keywords: *artificial intelligence, legal liability, malicious code, cyber incidents, generated objects status, bypassing restrictions.*

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Introduction

The rapid implementation of digital technologies is blurring the traditional boundaries between human and machine. Today, algorithms create highly complex software products, write texts, and generate visual images. In this regard, the relevance of the problem of ownership rights to content generated by artificial intelligence is increasing every day. Who legally owns the digital object — the developer of the neural network or the user who formulated a precise text prompt? The issue of authorship instantly moves from the realm of

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

abstract theory into harsh legal reality when, instead of a useful product, malicious code is generated [3, p. 82]. It is precisely here that the problem of ownership rights is most closely intertwined with tort obligations: recognizing a subject as the owner or author of the generated result inevitably entails placing the burden of responsibility on them for the consequences of using this code.

However, the current legal framework turns out to be unprepared for such radical technological challenges. Hence, a clear problem statement is formed: how to fairly and legally accurately delineate responsibility between the creator of an intelligent system and the end user who purposefully bypassed built-in security filters to generate a computer virus? Classical doctrines of civil law are historically oriented towards subjects endowed with free will and consciousness [7, p. 14]. When a self-learning algorithm is involved in the process of creating a malicious object, a pronounced "liability gap" emerges [5, p. 817]. Regulations aimed at the large-scale support of artificial intelligence technologies in the economy [9, art. 2] do not yet provide an exhaustive answer to the question of the culpability of the parties in the event of the intentional hacking of protective barriers (the so-called jailbreak). In essence, it is necessary to answer an extremely complex legal question: is the successful circumvention of restrictions solely the malicious intent of the user, or did the developer initially release a vulnerable product into civil circulation, for the flaws of which they must bear strict legal responsibility [2, p. 47].

Legal Grounds for Liability for the Generation and Use of Malicious Code

The analysis of the legal grounds for liability for generating malicious code using algorithms requires a deep dive into the current norms of civil legislation. The basic principles of compensation for harm, laid down in the Civil Code of the Russian Federation, were initially designed to regulate relations exclusively between individuals and legal entities [1, art. 410]. However, the introduction of self-learning neural networks into the process of creating software products breaks the familiar paradigm. In situations where an algorithm acts as a powerful computational tool for writing a computer virus, traditional mechanisms for establishing guilt fail. A specific "liability gap" is formed, which manifests itself most vividly and destructively when analyzing complex cyber incidents involving fully autonomous systems [5, p. 818].

The key difficulty lies in the legal qualification of the very process of generating malicious digital content. Obviously, artificial intelligence lacks independent legal personality, so any attempts to hold the algorithm itself legally liable are completely devoid of practical sense [3, p. 83]. The attention of legal scholars is focused on finding the guilty party among the people and corporations involved in the operation of the system. Existing legal mechanisms for distributing responsibility offer several theoretical approaches [2, p. 46]. The

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

basic concept relies on the strict guilt of the end user: if a person purposefully forms a malicious prompt, bypasses protective restrictions, and ignores the rules of operation, they are recognized as the main subject of the offense.

At the same time, it is absolutely impossible to exclude the creator of the neural network from the chain of responsibility. In doctrine, the possibility of applying the concept of a source of increased danger to modern artificial intelligence technologies is actively discussed [10, p. 56]. If an algorithm released into circulation initially contains critical architectural vulnerabilities that allow bypassing built-in security filters without much effort, liability can be imposed on the developer for releasing a defective product. Foreign experience is also interesting in this context. For example, through the prism of the concept of French civil liability, there is a clear trend of applying the liability regime for harm caused by things [6, p. 35]. According to this approach, the creator or owner of an "intellectual thing" bears the burden of proving the absence of their guilt if the generated code caused damage to third parties.

In essence, current legislation, including federal norms on supporting the development of artificial intelligence technologies [9, art. 2], sets only general framework conditions for the digital economy. Issues of a detailed and fair delineation of guilt for cyber incidents currently remain outside the scope of strict regulatory control. Attempts to apply classical liability models to the facts of illegal use of neural networks only reveal an acute need for the development of specialized legal regimes [12, p. 47]. Ultimately, effective legal counteraction against threats emanating from generated malicious code requires not just a targeted adaptation of old codes, but the formation of qualitatively new legal grounds capable of fairly dividing the burden of responsibility between an imprudent developer and a malicious user [7, p. 15].

The specifics of using intelligent systems require a differentiated approach in other industries as well. Thus, in forensic activity, the use of algorithms is associated with the highest risks of violating citizens' rights in case of incorrect analysis of digital traces [4, p. 46]. The autonomy of programs here must be strictly controlled, and the final decisions must be verified by a human [8, p. 176]. Similar challenges are observed in the context of the digitalization of the educational environment, where the use of neural networks requires transparency and the possibility of challenging the results [13, p. 12]. In general, legal liability in the field of artificial intelligence requires a deep theoretical rethinking [11, p. 22].

Delineation of Liability in the Intentional Circumvention of Neural Network Restrictions

The issue of distributing legal guilt acquires maximum urgency when a user purposefully overcomes the protective algorithms of a system to create malicious software. The intentional circumvention of restrictions (jailbreak) is a conscious act aimed at exploiting the vulnerabilities of a neural network. From the perspective of classical legal liability models, it is the user who

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

becomes the key initiator of the offense in this situation [7, p. 16]. By formulating specific prompts, they force the algorithm to ignore embedded ethical and technical barriers. Consequently, a direct causal link is established between the intent of the end operator and the resulting cyber incident [5, p. 821].

However, completely exempting the creator of the intelligent system from liability seems legally incorrect. Legal mechanisms for distributing the burden of damage compensation require a detailed analysis of the developer's actions during the model's training and testing phase [2, p. 48]. If the neural network architecture has critical flaws that allow blocks to be removed by entering the simplest text commands, a solid ground arises for recognizing the manufacturer's guilt. Legal science actively examines theoretical models that allow for joint liability in cases where the creator released a knowingly vulnerable digital product into civil circulation [10, p. 57]. Negligence in designing security filters is practically equated to the release of a product of inadequate quality, which inevitably entails corresponding tort obligations [3, p. 84].

The key criterion for a fair delineation of guilt is the level of effort exerted by the hacker and the degree of objective reliability of the original security systems. In cases where the user applies highly technical and non-standard circumvention methods that objectively could not have been foreseen during development, the entire weight of guilt is entirely shifted to the initiator of the malicious prompt [12, p. 49]. In essence, the developer cannot bear absolute responsibility for every unlawful act committed using their software if all reasonable precautions were taken and current security standards were considered at the creation stage.

Ultimately, solving the "liability gap" problem requires a flexible and differentiated approach. Legal liability for generating malicious code must be clearly divided: the end user answers for criminal intent and the direct application of the generated object, while the AI model creator answers for technical negligence and the lack of appropriate basic protection mechanisms. Only such a distribution of roles allows maintaining a fragile balance between protecting public interests and stimulating the further development of the artificial intelligence industry.

Conclusion

The rapid development of neural network technologies has exposed serious gaps in existing legal regulation. The problem of distributing guilt for the generation of malicious code during the intentional circumvention of an algorithm's restrictions does not have a definitive solution within the framework of classical civil law [1, art. 410]. In essence, the legal system faces the need to adapt to conditions where an intelligent program acts not just as an ordinary tool, but as a complex independent link in the chain of causing harm [2, p. 49].

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

A fair delineation of legal liability requires a comprehensive approach that takes into account both the malicious intent of the end operator and the degree of prudence of the developer [5, p. 823]. If bypassing security filters (jailbreak) became possible due to critical negligence at the stage of designing and training the model, guilt should be distributed jointly [10, p. 58]. However, in situations where the initiator applies high-tech, non-standard, and unpredictable methods of hacking an initially reliable architecture, the burden of compensation for damages is entirely shifted to the malicious actor [7, p. 18].

Ultimately, to effectively counter cyber threats and eliminate the "liability gap", the immediate formation of specialized legislation is required. It is necessary to develop clear technical and legal security standards for creators of AI models [9, art. 4], while not forgetting about strict legal sanctions for users who intentionally turn a useful digital product into a destructive weapon [3, p. 85]. Only a carefully calibrated balance between state quality control of algorithms and support for innovation will ensure the safe and sustainable development of the digital economy [12, p. 51].

References

1. Гражданский кодекс Российской Федерации (часть вторая) : Федеральный закон от 26.01.1996 № 14-ФЗ (ред. от 24.06.2025) // Собрание законодательства РФ. – 1996. – № 5. – Ст. 410.

2. Казанцев, Д. А. Правовые механизмы распределения ответственности за вред, причиненный системами искусственного интеллекта / Д. А. Казанцев // Journal of Digital Technologies and Law. – 2025. – № 3.

3. Лаптев, В. А. Понятие искусственного интеллекта и юридическая ответственность за его работу / В. А. Лаптев // Право. Журнал Высшей школы экономики. – 2019. – № 2.

4. Меретуков, Г. М. Особенности использования искусственного интеллекта в криминалистической деятельности: некоторые актуальные вопросы / Г. М. Меретуков, А. С. Усенко // Вестник Томского государственного университета. Право. – 2025. – № 57. – С. 44–58.

5. Савров, А. Н. Проблема «пробела ответственности» в праве искусственного интеллекта: правовые механизмы распределения ответственности за киберинциденты с участием автономных систем / А. Н. Савров, О. В. Олейников // Вестник науки. – 2026. – Т. 5, № 5 (98). – С. 816–825.

6. Свиридова, Е. А. Проблема ответственности искусственного интеллекта через призму концепции гражданско-правовой ответственности Франции / Е. А. Свиридова // Образование и право. – 2020. – № 4.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

7. Селиванова, Е. С. Правовые модели ответственности за вред, причиненный системами ИИ: основания, механизмы и критерии формирования / Е. С. Селиванова, В. В. Саркисян // Вестник юридического факультета Южного федерального университета. – 2025. – № 3.

8. Усенко, А. С. Некоторые актуальные вопросы использования искусственного интеллекта в криминалистической деятельности / А. С. Усенко // Санкт-Петербургская школа криминалистики : материалы, Санкт-Петербург, 17–19 октября 2024 года. – Санкт-Петербург : Университет прокуратуры Российской Федерации, 2025. – С. 174–179.

9. Федеральный закон от 26.07.2026 № 243-ФЗ «О поддержке развития технологий искусственного интеллекта в Российской Федерации». – Текст : непосредственный.

10. Филина, Н. В. Юридическая ответственность искусственного интеллекта: теоретические модели и практические решения / Н. В. Филина, Ю. А. Гудков, И. Н. Сенин // Журнал прикладных исследований. – 2025. – № 7.

11. Шестопал, А. Д. Искусственный интеллект и правовая ответственность / А. Д. Шестопал. – Текст : непосредственный.

12. Models of civil liability for the unlawful use of artificial intelligence in the economy / N. Tursunbaeva, Ch. Turatbekova, A. Tukubasheva [et al.] // Veredas do Direito. – 2026. – Vol. 23, No. 4. – P. e234833.

13. Tendências de transformação do ensino superior no contexto da digitalização / G. Ismagilova, L. Miftakhova, I. Kurmaeva [et al.] // Política e Gestão Educacional. – 2025. – Vol. 29. – P. e025114.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 621.865.8:629.735

Chaikina D.V., Khafizov I.I. A method for fault localization and recovery action selection in the autonomous service cycle of the Falco robotic system

Метод локализации отказов и выбора восстановительного действия в автономном сервисном цикле робототехнического комплекса «Фалько»

Chaikina Dzhamilya Viktorovna,
Master's degree in Innovation (27.04.05), Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan
Khafizov Ildar Ilsurovich,
Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Physics of Advanced Technologies and Materials Science, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan
Чайкина Джамиля Викторовна,
магистр по направлению подготовки 27.04.05 «Инноватика»,
ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань
Хафизов Ильдар Ильсурович,
канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры физики перспективных технологий и материаловедения,
ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань

Abstract. *A method for fault localization and recovery action selection in the autonomous service cycle of the FALCO robotic system is proposed. Evidence from the unmanned aircraft, payload, and service dock is combined in a three-state diagnostic vector: a symptom is confirmed, rejected, or unavailable. Bayesian updating ranks seven fault classes, while automatic intervention is permitted only when both the maximum posterior probability and the margin between the two leading hypotheses satisfy confidence thresholds. A recovery action is selected by minimizing expected risk, including action cost and the consequence of an incorrect repair. The method is evaluated in a reproducible computational experiment comprising nine synthetic scenarios. In seven single-fault scenarios, the leading hypothesis matched the injected class with posterior probabilities from 0.948 to 0.996. Propulsion degradation retained a probability of 0.945 when the vibration channel was unavailable. For a deliberately conflicting incomplete packet, the posterior margin was 0.165 against a threshold of 0.20; therefore, the method selected an extended test instead of an invasive action. These results are not presented as field validation and provide a transparent basis for subsequent bench calibration.*

Keywords: *technical diagnostics, fault localization, Bayesian inference, action selection, autonomous maintenance, UAV, service dock, robotic system.*

Аннотация. *Предложен метод локализации отказов и выбора восстановительного действия для автономного сервисного цикла робототехнического комплекса «ФАЛЬКО». Метод объединяет признаки от бортовых подсистем беспилотного летательного аппарата, полезной нагрузки и сервисного дока в трёхсостоянийный диагностический вектор: признак подтверждён, отклонён либо не измерен. Для ранжирования семи классов отказов применяется байесовское обновление, а разрешение автоматического вмешательства определяется максимальной апостериорной вероятностью и разностью двух ведущих гипотез. Восстановительное действие выбирается минимизацией ожидаемого риска с учётом стоимости операции и последствий ошибочного ремонта. Выполнен воспроизводимый вычислительный эксперимент на девяти синтетических сценариях. В семи одноотказных сценариях ведущая гипотеза совпала с заданным классом при вероятности 0,948–0,996; при отсутствии вибрационного измерения деградация движителя сохранила вероятность 0,945. Для противоречивого неполного пакета разность гипотез составила 0,165 при пороге 0,20, поэтому вместо вмешательства выбран*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

расширенный тест. Результаты не трактуются как натурная валидация и задают проверяемую основу для последующей стендовой калибровки.

Ключевые слова: *техническая диагностика, локализация отказов, байесовский вывод, выбор действия, автономное обслуживание, БПЛА, сервисный док, робототехнический комплекс.*

Рецензент: Дёма Роман Рафаэлевич — доктор технических наук, доцент кафедры «Машины и технологии обработки давлением и машиностроения» ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова»

Введение

Автономность робототехнического комплекса определяется не только способностью беспилотного летательного аппарата выполнить маршрут. После возвращения аппарат должен безопасно завершить сервисный цикл: состыковаться с доком, передать данные, восстановить запас энергии, пройти контроль состояния и получить обоснованное действие при обнаружении отклонения. Ошибка на этом этапе может привести либо к повторному запуску неисправного оборудования, либо к ненужной замене исправного модуля.

В полёте признаки отказов обычно формируются внутри одного динамического контура. В сервисном цикле картина распределена между тремя источниками: бортовой системой, сменной полезной нагрузкой и доком. Например, отсутствие зарядного тока может быть связано с батареей, контактами стыковочного узла или ошибкой сервисного механизма; рост тока движителя без вибрационного канала остаётся неполным, но значимым свидетельством. Простое правило «первый признак — первое действие» не учитывает конкурирующие объяснения и качество пакета наблюдений.

Исследования по диагностике БПЛА развили методы формирования невязок, наблюдатели, нейросетевые классификаторы и отказоустойчивое управление [1–7]. Вероятностное объединение разнородных сведений применяется в диагностических сетях [8], а теория устранения неисправностей связывает диагноз с ценой проверки или ремонта [9, 10]. Однако для автономного дока требуется отдельный прикладной уровень: он должен сопоставить признаки разных подсистем, оценить неоднозначность и выбрать не только класс отказа, но и безопасное следующее действие.

Цель работы — разработать формализованный метод локализации отказов и выбора восстановительного действия в сервисном цикле комплекса «ФАЛЬКО». Исследовательский вопрос сформулирован следующим образом: позволяет ли совместное использование апостериорного ранжирования и риск-ориентированного выбора действия сохранить однозначное решение при неполном наблюдении и отказаться от вмешательства при конфликте признаков? Научная новизна состоит в объединении трёх элементов в одном контуре: многоканального сервисного

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

диагностирования, явной оценки разрыва между гипотезами и решения по ожидаемому риску с обязательной проверкой результата.

Материалы и методы

Объектом моделирования принят завершённый миссионно-сервисный цикл комплекса «ФАЛЬКО»: БПЛА возвращается в док, после чего доступны послеполётные телеметрические итоги, результаты самоконтроля полезной нагрузки и состояния сервисных механизмов. Полётное управление, планирование маршрута, размещение доков и прогноз остаточного ресурса находятся за границами исследования. Метод начинает работу после безопасной посадки и не выдаёт команд управления в воздухе.

Диагностическое пространство содержит семь взаимоисключающих классов одного доминирующего отказа $F = \{F1, \ldots, F7\}$. Такое допущение принято для первичного вычислительного эксперимента. Составные отказы не принудительно сводятся к одному классу: конфликт признаков должен уменьшать доверие и переводить цикл к расширенной проверке. Для каждого класса определены основной объект локализации и наблюдаемые каналы (таблица 1).

Таблица 1

Классы отказов и источники диагностических признаков

Класс	Локализуемый отказ	Основные признаки	Источник
F1	деградация батареи / дисбаланс ячеек	рост внутреннего сопротивления; разбаланс напряжений	БПЛА, зарядный канал
F2	деградация движительного модуля	аномальный ток двигателя; повышенная вибрация	БПЛА
F3	отказ навигационного датчика	рассогласование GNSS и инерциального канала	БПЛА
F4	нарушение полезной нагрузки	ошибка самотеста или недействительная калибровка	полезная нагрузка
F5	отказ стыковки / зарядного интерфейса	нет подтверждения фиксации; отсутствует зарядный ток	док и БПЛА
F6	отказ канала связи / передачи данных	потери пакетов или нарушение целостности передачи	БПЛА и док
F7	отказ сервисного механизма	тайм-аут операции или повышенный ток привода	док

Представление наблюдений

Использованы десять бинарных признаков: s1 — повышенное внутреннее сопротивление батареи; s2 — дисбаланс напряжений ячеек; s3 — аномальный ток движителя; s4 — повышенная вибрация; s5 — рассогласование GNSS/IMU; s6 — ошибка

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

самотеста или калибровки полезной нагрузки; s7 — фиксация/центрирование не подтверждены; s8 — зарядный ток отсутствует; s9 — потеря пакетов или ошибка целостности; s10 — тайм-аут либо повышенный ток сервисного привода. Отсутствие измерения не приравнивается к норме. Поэтому компонент диагностического вектора имеет три состояния:

$$y_i \in \{1, 0, \varnothing\} \quad (1)$$

Связь между признаками и отказами задаётся матрицей qij = P(yi = 1 | Fj). В таблице 2 приведена фиксированная матрица вычислительного эксперимента. Коэффициенты назначены экспертно так, чтобы отразить физически ожидаемые связи; они опубликованы полностью для воспроизводимости и не являются оценками частот реальной эксплуатации «ФАЛЬКО». В прикладной реализации матрица должна уточняться по стендовым и эксплуатационным данным.

Таблица 2

Матрица условных вероятностей qij

Признак	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
s1 — сопротивление батареи	0,85	0,15	0,08	0,05	0,10	0,05	0,08
s2 — дисбаланс ячеек	0,90	0,10	0,05	0,05	0,08	0,04	0,06
s3 — ток движителя	0,30	0,88	0,12	0,10	0,12	0,08	0,20
s4 — вибрация	0,10	0,82	0,18	0,10	0,08	0,06	0,18
s5 — GNSS/IMU	0,08	0,10	0,92	0,12	0,08	0,12	0,07
s6 — самотест нагрузки	0,05	0,08	0,08	0,92	0,06	0,12	0,10
s7 — фиксация в доке	0,08	0,06	0,05	0,08	0,88	0,08	0,30
s8 — нет зарядного тока	0,50	0,05	0,05	0,05	0,88	0,12	0,20
s9 — ошибка передачи	0,05	0,05	0,15	0,12	0,08	0,92	0,10
s10 — привод сервиса	0,10	0,15	0,05	0,08	0,22	0,08	0,90

Вероятностная локализация

Для локализации применяется наивный байесовский классификатор с условной независимостью признаков при заданном классе. Произведение вычисляется только по множеству O фактически полученных наблюдений; компоненты со значением ∅ исключаются. При равных априорных вероятностях $\pi_j = 1/7$ апостериорная вероятность имеет вид:

$$p_j(y) = [\pi_j \prod_{i \in O} q_{ij}^{y_i}(1-q_{ij})^{1-y_i}] / [\sum_k \pi_k \prod_{i \in O} q_{ik}^{y_i}(1-q_{ik})^{1-y_i}] \quad (2)$$

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

В программной реализации расчёт ведётся в логарифмической области, что предотвращает численное обнуление произведений. Кандидатом считается класс с максимальным pmax. Одной величины pmax недостаточно, поскольку два класса могут получить сопоставимые значения. Поэтому дополнительно рассчитывается запас решения — разность первой и второй вероятностей в ранжированном векторе:

$$\Delta = p(1) - p(2) \quad (3)$$

Автоматическое восстановительное действие допускается при pmax ≥ 0,80 и Δ ≥ 0,20. Пороговые значения заданы как исследовательские настройки синтетического эксперимента, а не как сертификационные нормы. При невыполнении хотя бы одного условия разрешены только расширенная диагностика либо безопасная изоляция оборудования.

Выбор восстановительного действия

Для классов F1–F7 предусмотрены соответствующие действия u1–u7: обслуживание батареи; замена движительного модуля; перекалибровка навигационного канала; переустановка и калибровка полезной нагрузки; очистка и повторная стыковка; сброс и проверка канала связи; обслуживание сервисного механизма. Дополнительные действия u8 и u9 — расширенный тест и карантин. Выбор производится по ожидаемому нормированному риску:

$$R(u \mid y) = C_u + \sum_j p_j(y) L(F_j, u) \quad (4)$$

Здесь Cu — стоимость времени и ресурсов действия, а L(Fj, u) — остаточные потери. Для правильного целевого действия принято L(Fj, uj) = 0,03hj; для ошибочного целевого действия L(Fj, uk) = hj при k ≠ j; для расширенного теста — 0,10hj, для карантина — 0,02hj. Коэффициент hj характеризует относительную критичность класса. Полный набор коэффициентов приведён в таблице 3.

Таблица 3

Нормированные коэффициенты риска вычислительного эксперимента

Класс	hj	Cu целевого действия	Целевое действие
F1	0,65	0,08	обслуживание или замена батареи
F2	0,95	0,12	замена движительного модуля
F3	0,90	0,07	перекалибровка навигационного канала
F4	0,55	0,06	переустановка и калибровка нагрузки
F5	0,75	0,05	очистка интерфейса и повторная стыковка
F6	0,60	0,04	сброс и проверка канала связи
F7	0,80	0,10	обслуживание сервисного механизма

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Для u8 принято C8 = 0,18, для u9 — C9 = 0,35. Если порог доверия выполнен, выбирается действие с минимальным R(u | y). Если порог не выполнен, множество допустимых действий ограничивается {u8, u9}. После любого восстановительного действия выполняется независимый проверочный тест. Положительный результат закрывает сервисный цикл; отрицательный переводит объект в карантин. Общая логика показана на рисунке 1.



Рисунок 1 — Контур локализации отказа, выбора действия и проверки восстановления (разработано авторами)

План вычислительного эксперимента

Сформированы девять синтетических сценариев. A1–A7 содержат по одному заданному классу отказа и полный пакет из десяти состояний: характерные признаки установлены в 1, остальные — в 0. В A8 для движительного отказа признак s3 подтверждён, а измерение s4 отсутствует; остальные признаки отклонены. В A9 доступны только два положительных сообщения s8 и s9, а остальные каналы не передали данных. Последний сценарий намеренно допускает конкуренцию версий F5 и F6.

Для каждого сценария вычислялись полный вектор p, pmax, вторая гипотеза, запас Δ, ожидаемый риск всех девяти действий и итоговое допустимое действие. Исходные qij, πj, hj, Cu и наблюдения указаны в статье; поэтому результаты могут быть независимо пересчитаны без закрытого набора данных. Критерием внутренней

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

проверки для A1–A7 служило совпадение ведущего класса с заданным, для A8 — сохранение ведущего F2 при пропуске канала, для A9 — блокирование целевого вмешательства.

Литературный обзор

Ранние исследования отказоустойчивости беспилотных вертолётов связывали обнаружение отказа с формированием аналитических невязок и последующей реконфигурацией. Heredia и соавт. рассмотрели обнаружение отказов датчиков и приводов малого автономного вертолёта [1]. В архитектуре Drozeski, Saha и Vachtsevanos диагностика была встроена в контур реконфигурируемого управления и подтверждалась лётными экспериментами [2]. Эти работы показывают необходимость связи диагноза с реакцией системы, но основное внимание уделяют сохранению управляемости в полёте.

Для многороторных аппаратов Avram, Zhang и Muse разработали схему обнаружения, изоляции и оценивания смещений акселерометров и гироскопов и представили экспериментальные результаты [3]. Saied и соавт. использовали измерения скоростей двигателей для диагностики и отказоустойчивого управления октоторотором [4]. Lien, Peng и Chen предложили адаптивный наблюдатель для условий отказа ротора [5], а Qin и соавт. объединили оценивание неисправности датчика с активным отказоустойчивым управлением квадрокоптером [6]. Современная работа Cacace и соавт. сочетает оценивание внешнего воздействия и рекуррентную нейронную сеть для распознавания моторных отказов в моделируемой среде [7]. Общим для этих подходов является использование динамики аппарата; признаки дока и полезной нагрузки как единого сервисного пакета в них не являются предметом выбора ремонтного действия.

Вероятностные графические модели дают другой способ объединить разнородные свидетельства. Cai и соавт. показали применение байесовской сети для многоканальной диагностики технической системы [8]. Для этапа после локализации важен выбор проверки или ремонта: Langseth и Jensen сформулировали устранение неисправностей как задачу теории решений с учётом стоимости действий и неполного эффекта ремонта [9]. Классическая работа de Kleer и Williams показывает, почему при нескольких совместимых объяснениях нельзя ограничиваться первым найденным диагнозом [10]. Эти идеи образуют методическую основу настоящего исследования.

Выявленный пробел состоит в отсутствии компактной процедуры для послемиссионного цикла, которая одновременно: принимает признаки с борта, нагрузки и дока; различает отрицательное наблюдение и отсутствие данных; количественно проверяет однозначность локализации; выбирает восстановление по ожидаемому риску; подтверждает результат отдельным тестом. Предлагаемый метод

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

закрывает этот пробел на уровне воспроизводимой концептуальной модели, не подменяя стендовую или полевую валидацию.

Результаты

Таблица 4

Результаты локализации и выбора действия

Код	Сценарий	Наблюдения	Две ведущие гипотезы	Δ	Решение	R
A1	Деградация батареи	1: s1, s2; остальные 0	F1=0,996; F2=0,001	0,995	обслуживание/замена батареи	0,103
A2	Деградация движителя	1: s3, s4; остальные 0	F2=0,990; F7=0,004	0,986	замена движительного модуля	0,156
A3	Отказ навигационного датчика	1: s5; остальные 0	F3=0,966; F4=0,012	0,954	перекалибровка навигационного канала	0,118
A4	Нарушение калибровки нагрузки	1: s6; остальные 0	F4=0,972; F6=0,012	0,961	переустановка и калибровка нагрузки	0,097
A5	Отказ стыковки/заряда	1: s7, s8; остальные 0	F5=0,989; F7=0,008	0,981	очистка и повторная стыковка	0,081
A6	Отказ канала связи	1: s9; остальные 0	F6=0,966; F3=0,014	0,952	сброс и проверка канала связи	0,083
A7	Отказ сервисного механизма	1: s10; остальные 0	F7=0,948; F4=0,014	0,934	обслуживание сервисного механизма	0,160
A8	Нет канала вибрации	1: s3; ∅: s4	F2=0,945; F7=0,017	0,928	замена движительного модуля	0,187
A9	Противоречивый неполный пакет	1: s8, s9; ∅: s1, s2, s3, s4, s5, s6, s7, s10	F6=0,457; F5=0,291	0,165	расширенный тест	0,248

В сценариях A1–A7 ведущая гипотеза совпала с заданным одиночным отказом. Минимальная максимальная вероятность получена для F7 в A7 и равна 0,9476; максимальная — для F1 в A1 и равна 0,9957. Запас решения находится в диапазоне 0,9337–0,9945, то есть во всех семи случаях существенно превышает порог 0,20.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Минимизация ожидаемого риска выбрала соответствующее целевое действие, а значение R составило от 0,0805 до 0,1597.

Сценарий A8 проверяет обработку отсутствующего измерения. При подтверждённом росте тока движителя и недоступном канале вибрации класс F2 сохранил pmax = 0,9454 и Δ = 0,9282. Значение не достигает результата A2 с двумя согласованными признаками (0,9904), что отражает потерю информации, но порог доверия остаётся выполненным. Метод не создаёт искусственного отрицательного свидетельства из пропуска s4.

В A9 одновременно получены сообщения об отсутствии зарядного тока и нарушении передачи, а остальные восемь каналов недоступны. Версия F6 получила вероятность 0,4566, F5 — 0,2911, F1 — 0,1030. Запас Δ = 0,1654 меньше порога, поэтому целевые операции блокированы. Из допустимых вариантов расширенный тест имеет ожидаемый риск 0,2477 и предпочтён карантину. Таким образом, противоречивый пакет не приводит к автоматическому ремонту по первому признаку.

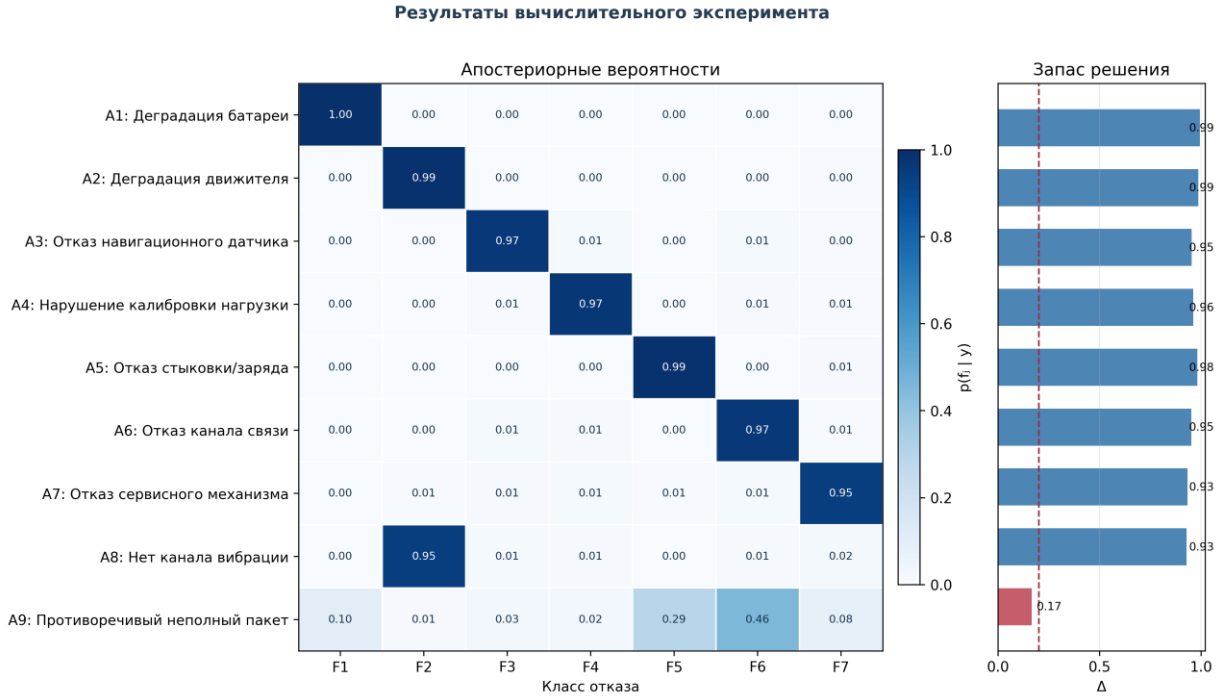


Рисунок 2 — Апостериорные вероятности и запас решения для синтетических сценариев (расчёт авторов)

Тепловая карта показывает диагональную структуру A1–A7 и снижение концентрации вероятности в A8. В A9 вероятность распределена между несколькими классами, а столбец запаса решения выделяет единственный случай ниже порога. Такое

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

представление полезно при проверке модели: оператор видит не только итоговую метку, но и альтернативную гипотезу, из-за которой вмешательство заблокировано.

Для n классов, m полученных признаков и r допустимых действий вычисление апостериорного вектора требует O(nm), а оценка рисков — O(nr). В рассматриваемом варианте $n = 7$, $m \le 10$, $r = 9$, поэтому расчёт не является вычислительным ограничением для контроллера дока. Более существенными остаются калибровка вероятностей, контроль качества входных измерений и независимость проверочного теста.

Обсуждение

Полученный результат подтверждает исследовательскую гипотезу в границах вычислительного эксперимента. Апостериорное ранжирование позволяет сохранить локализацию при пропуске одного измерительного канала, если оставшееся свидетельство достаточно специфично. Одновременно запас Δ не допускает свести конфликт к формальной победе максимальной вероятности. Это различие принципиально для автономного сервиса: действие по замене модуля имеет физические и временные последствия, тогда как дополнительный тест является обратимым шагом.

Предложенный контур отличается от активного отказоустойчивого управления [2, 4–6]. Он не компенсирует отказ во время полёта, а работает после безопасного завершения миссии и выбирает сервисное действие. От методов, использующих только динамику БПЛА [1, 3, 7], подход отличается составом наблюдений: батарея, полезная нагрузка, стыковочный интерфейс, связь и механизмы дока рассматриваются в одном диагностическом пространстве. От байесовской диагностики как таковой [8] метод наследует работу с неопределённостью, но дополняет её явным порогом неоднозначности, ограничением допустимых действий и проверкой результата.

Решение остаётся объяснимым при условии, что вместе с ним сохраняются исходные состояния y_i, версия матрицы q_{ij}, априорные вероятности, полный вектор p, значения p_{max} и Δ, набор коэффициентов риска и результат проверочного теста. Такой журнал нужен не для доказательства «правильности» математической модели, а для воспроизведения конкретного решения и анализа ошибочных вмешательств. Порядок классов или признаков не должен влиять на результат, что устраняет неоднозначность последовательных правил типа if–then.

Главное ограничение — параметры модели заданы экспертно, а сценарии синтетические. Высокие вероятности A1–A7 следуют из спроектированной матрицы и не являются оценкой эксплуатационной точности. Допущение условной независимости упрощает расчёт, хотя ток и вибрация либо фиксация и заряд могут быть коррелированы. Равные априорные вероятности не отражают реальную частоту

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

отказов. Наконец, модель одного доминирующего класса не локализует составные отказы; она лишь должна распознать недостаток уверенности, что показано одним конфликтным сценарием.

Для перехода к опытной эксплуатации необходимы четыре этапа. Сначала требуется стендовая разметка отказов с контролируемым изменением тяжести и режима работы. Затем qij и πj следует оценить с доверительными интервалами и проверить калибровку p на данных, не использованных при настройке. После этого пороги pmin, Δ и коэффициенты риска должны быть выбраны по цене ложного ремонта и пропущенного отказа. Завершающим этапом являются длительные циклические испытания «миссия — стыковка — диагностика — восстановление — проверка» с регистрацией времени решения, доли дополнительных тестов, ложных вмешательств и остаточного риска.

Заключение

Разработан метод послемиссионной локализации семи классов отказов комплекса «ФАЛЬКО» по десяти признакам от БПЛА, полезной нагрузки и сервисного дока. Отсутствующее измерение представлено отдельным состоянием и не подменяется отрицательным наблюдением.

Предложено двухуровневое правило допуска автоматического вмешательства: максимальная апостериорная вероятность должна быть не ниже 0,80, а разность двух ведущих гипотез — не ниже 0,20. Действие выбирается по минимуму ожидаемого риска и завершается независимым проверочным тестом.

В воспроизводимом синтетическом эксперименте семь одиночных отказов локализованы как ведущие классы при pmax = 0,948–0,996. При пропуске вибрационного канала для движительного отказа получено pmax = 0,945. Конфликтный неполный пакет дал Δ = 0,165 и корректно перевёл цикл к расширенной диагностике без целевого ремонта.

Численные коэффициенты и результаты не являются доказательством готовности к эксплуатации. Следующий этап — стендовая идентификация вероятностей и потерь, проверка составных отказов и валидация порогов на независимой серии сервисных циклов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование выполнено без внешнего финансирования.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

References

1. Heredia G., Ollero A., Bejar M., Mahtani R. Sensor and actuator fault detection in small autonomous helicopters // Mechatronics. 2008. Vol. 18, No. 2. P. 90–99. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2007.09.007.

2. Drozeski G.R., Saha B., Vachtsevanos G.J. A Fault Detection and Reconfigurable Control Architecture for Unmanned Aerial Vehicles // 2005 IEEE Aerospace Conference. 2005. P. 1–9. DOI: 10.1109/AERO.2005.1559597.

3. Avram R.C., Zhang X., Muse J. Quadrotor Sensor Fault Diagnosis with Experimental Results // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2017. Vol. 86. P. 115–137. DOI: 10.1007/s10846-016-0425-1.

4. Saied M., Lussier B., Fantoni I., Shraim H., Francis C. Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control of an Octorotor UAV using motors speeds measurements // IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50, No. 1. P. 5263–5268. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.468.

5. Lien Y.-H., Peng C.-C., Chen Y.-H. Adaptive Observer-Based Fault Detection and Fault-Tolerant Control of Quadrotors under Rotor Failure Conditions // Applied Sciences. 2020. Vol. 10, No. 10. Article 3503. DOI: 10.3390/app10103503.

6. Qin L., He X., Yan R., Zhou D. Active Fault-Tolerant Control for a Quadrotor with Sensor Faults // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2017. Vol. 88. P. 449–467. DOI: 10.1007/s10846-017-0474-0.

7. Cacace J., Scognamiglio V., Ruggiero F., Lippiello V. Motor Fault Detection and Isolation for Multi-Rotor UAVs Based on External Wrench Estimation and Recurrent Deep Neural Network // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2024. Vol. 110. Article 148. DOI: 10.1007/s10846-024-02176-2.

8. Cai B., Liu Y., Fan Q., Zhang Y., Liu Z., Yu S., Ji R. Multi-source information fusion based fault diagnosis of ground-source heat pump using Bayesian network // Applied Energy. 2014. Vol. 114. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.09.043.

9. Langseth H., Jensen F.V. Decision theoretic troubleshooting of coherent systems // Reliability Engineering & System Safety. 2003. Vol. 80, No. 1. P. 49–62. DOI: 10.1016/S0951-8320(02)00202-8.

10. de Kleer J., Williams B.C. Diagnosing multiple faults // Artificial Intelligence. 1987. Vol. 32, No. 1. P. 97–130. DOI: 10.1016/0004-3702(87)90063-4.multiple faults. Artificial Intelligence, 32(1), 97–130. https://doi.org/10.1016/0004-3702(87)90063-4

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

TRANSPORT AND MOBILITY

UDC 621.396.93+629.7

Andryushchenko S.A., Korolkov E.V., Nazarov P.S. Methods of aviation electrical communication between air traffic control authorities and UAV operators

Способы авиационной электросвязи между органами УВД и операторами БПЛА

Andryushchenko Sofya Alekseevna,
Korolkov Evgeny Valeryevich,
Students, 4th year
Nazarov Pavel Sergeevich,
Senior Lecturer.
FSBEI HE SPbSUGA named after A.A. Novikov
Андрющенко Софья Алексеевна,
Корольков Евгений Валерьевич,
Студенты, 4 курс
Назаров Павел Сергеевич
ст. преподаватель.
ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова

Abstract. *The aim of the study presented in the article was to examine the proposed and existing methods of communication between air traffic control (ATC) authorities and operators of unmanned aerial vehicles (UAVs), as well as to develop a concept for a new method of communication between ATC authorities and UAV operators, taking into account the types of control panels (CP), in order to improve the efficiency and safety of air traffic.*

Keywords: *ATC authority, ATC, operator, control panel, control unit.*

Аннотация. *Целью представленного в статье исследования было изучение предлагаемых и имеющихся способов ведения связи между органами управления воздушным движением (далее УВД) и операторами беспилотных летательных аппаратов (далее БПЛА), а также разработка концепции нового способа ведения связи между органами УВД и операторами БПЛА с учетом видов пультов управления (далее ПУ), в целях повышения эффективности и безопасности воздушного движения.*

Ключевые слова: *орган УВД, УВД, оператор, пульт управления, ПУ.*

Рецензент: Дёма Роман Рафаэлевич — доктор технических наук, доцент кафедры «Машины и технологии обработки давлением и машиностроения» ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова»

Введение: В процессе полёта экипажи ВС ведут радиообмен с органами УВД, посредством различных средств связи. Каждый этап полёта сопровождается соответствующим органом УВД, который собирает информацию от экипажей, выдает команды в отношении управления траекторией ВС, а также реагирует на экстренные и критические ситуации. Сам процесс радиообмена же мгновенный, то есть после

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

запроса или команды, поступает мгновенный ответ. Но данной возможностью обладают только пилотируемые ВС с имеющимся оборудованием, отсюда возникает вопрос как ввести связь с операторами беспилотников?

Предлагаемые способы связи между органами УВД и операторами БПЛА, другими научными исследователями:

1. Посредством передачи информации через сам БПЛА на пульт управления оператора;
2. Посредством передачи информации через наземные приёмопередающие станции на пульт управления оператора.

Рассмотрим подробнее первый вариант, в нем подразумевается, что сам беспилотный летательный аппарат, становится ретранслятором информации от органов УВД, непосредственно оператору на его пульт управления [1] (рис.1). В данном случае информация от цента УВД поступает на БПЛА и ретранслируется на пульт управления по линии связи C2 “command and control” (управлять и контролировать). Линия связи C2 это – линия передачи данных между дистанционно пилотируемым воздушным судном и пунктом дистанционного пилотирования в целях управления полётом [2]. Линия связи C2 обеспечивается наземным оборудованием по следующим частотам:

- 136.925 МГц, 113,250 МГц;
- В диапазоне частот 960-1164 МГц;
- В диапазоне частот 5030-5091 МГц.

Также эту линию связи обеспечивают спутниковые линии (рис. 2) в следующих диапазонах частот:

- 1545-1555 МГц;
- 1610-1626,5 МГц;
- 1646,5-1656,5 МГц;
- 5000-5150 МГц;
- 11-30 ГГц.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

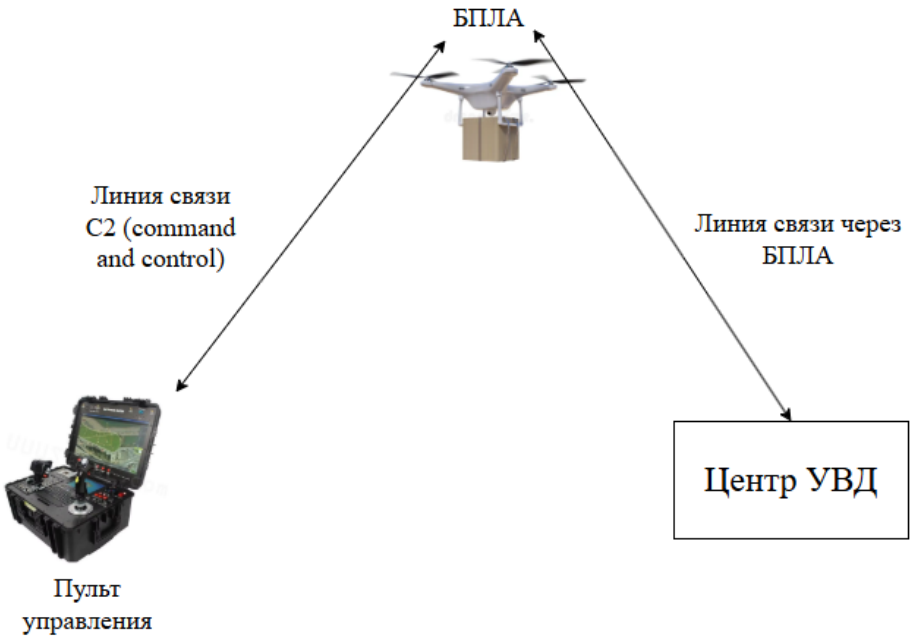


Рис. 1. Передача информации через БПЛА, по линии связи С2.

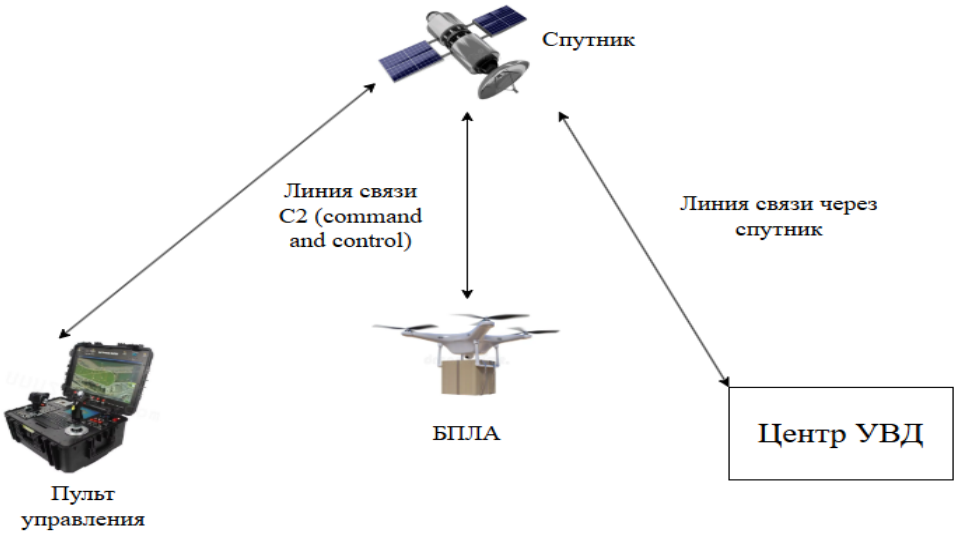


Рис. 2. Передача информации через спутник и линию связи С2.

Передача по линии С2 подразумевает только команды для управления беспилотного ВС, осуществление радиообмена невозможно, поскольку радиосообщения достаточно “тяжелы” и требуют соответствующих радиотехнических средств на борту ВС, под задачу радиообмена. Установка же этих средств на борт беспилотного ВС возможна, но встает вопрос о создании нового канала связи между БПЛА и пультом управления, что в свою очередь

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

средство затратно и технически сложно, ведь информация должна быть надежно и точно передана. Но в настоящий момент на некоторых воздушных судах применяется технология “Controller–Pilot Data Link Communications” (CPDLC, в переводе связь пилот-диспетчер). Данная технология подразумевает передачу текстовых сообщений в двустороннем порядке [3]. Текстовые сообщения “легче” для передачи, чем стандартный радиообмен. Текстовые сообщения можно сжимать и разжимать, таким образом им требуется меньше места в канале связи, поэтому применять данную технологию можно через канал С2. Также со стороны оператора не требуется наличие устройств для вывода и ввода звуковой информации. Необходимо наличие монитора для вывода информации и клавиатуры для ввода, что имеется на пультах управления.

Достоинством данного способа является передача информации через имеющиеся средства, то есть без установки дополнительного оборудования и средств.

Недостатки:

- Задержка при передаче и получении информации от органов УВД;
- Ограниченная пропускная способность по каналу связи С2;
- Уязвимость к помехам и перехватам информации.

Теперь перейдём ко второму варианту, он предполагает создание наземных центров, в которые будет поступать информация от органов УВД и её дальнейшая передача на пульт управления посредством локальной сети (рис. 3) [4]. Здесь же подразумевается создание новой линии связи, по которой можно ввести, как и привычный радиообмен, так и передачу текстовых и графических сообщений.

Достоинства:

- Высокая помехоустойчивость, так как передача происходит по локальным сетям;
- Относительно большая пропускная способность;
- Низкая задержка при передаче информации;

Недостатки:

- Высокая затратность, дорогостоящие создание центров передачи и локальных сетей;
- Невозможность связи операторов, с мобильными пультами управления, с органами УВД.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

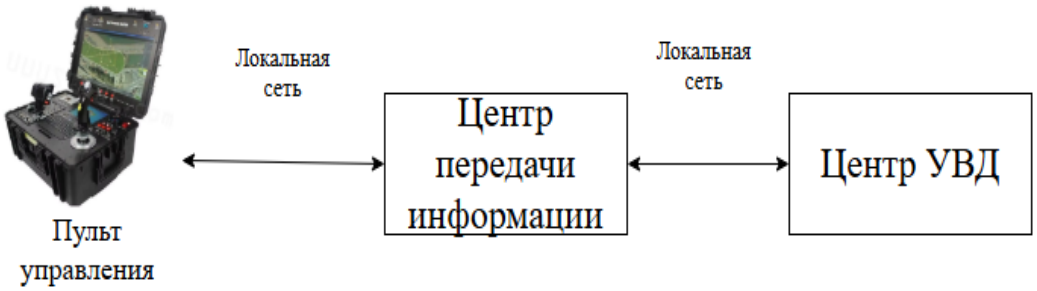


Рис. 3. Передача информации через центр передачи информации на пульт управления по локальной сети.

Предлагаемый способ связи между органами УВД и операторами БПЛА авторами статьи

В современное время возможность находится в интернете обеспечивается различными сетями, в том числе сетями 4G, 5G, а также развивающеюся сетью 6G. Данные сети обладают высокой скоростью передачи данных, как и на стационарных так и на мобильных устройствах. Например, скорость передачи данных в сети 4G, может достигать 40 Мбит/с и выше [5], соответственно сети 5G и 6G обладают скоростями выше, чего вполне достаточно для введения радиообмена или передачи текстовых или графических сообщений. Схема предлагаемого способа выглядит следующим образом: (рис. 4).

1. Передача информации от центра УВД в сетевой центр по локальной сети, в свою очередь сетевой центр может быть как коммерческий, так и специально сформированный под задачи УВД;
2. Передача информации от сетевого центра на стационарный пульт управления БПЛА;
3. Передача информации от сетевого центра на вышку связи соответствующей сети, вышки связи могут быть как коммерческими при коммерческих центрах или специально сформированных центров, так сделанные только под задачи УВД;
4. Передача информации от вышки связи на мобильный пульт управления БПЛА;
5. Передача информации от сетевого центра на ретранслирующий спутник;
6. Передача информации с ретранслирующего спутника на мобильный пульт управления БПЛА.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

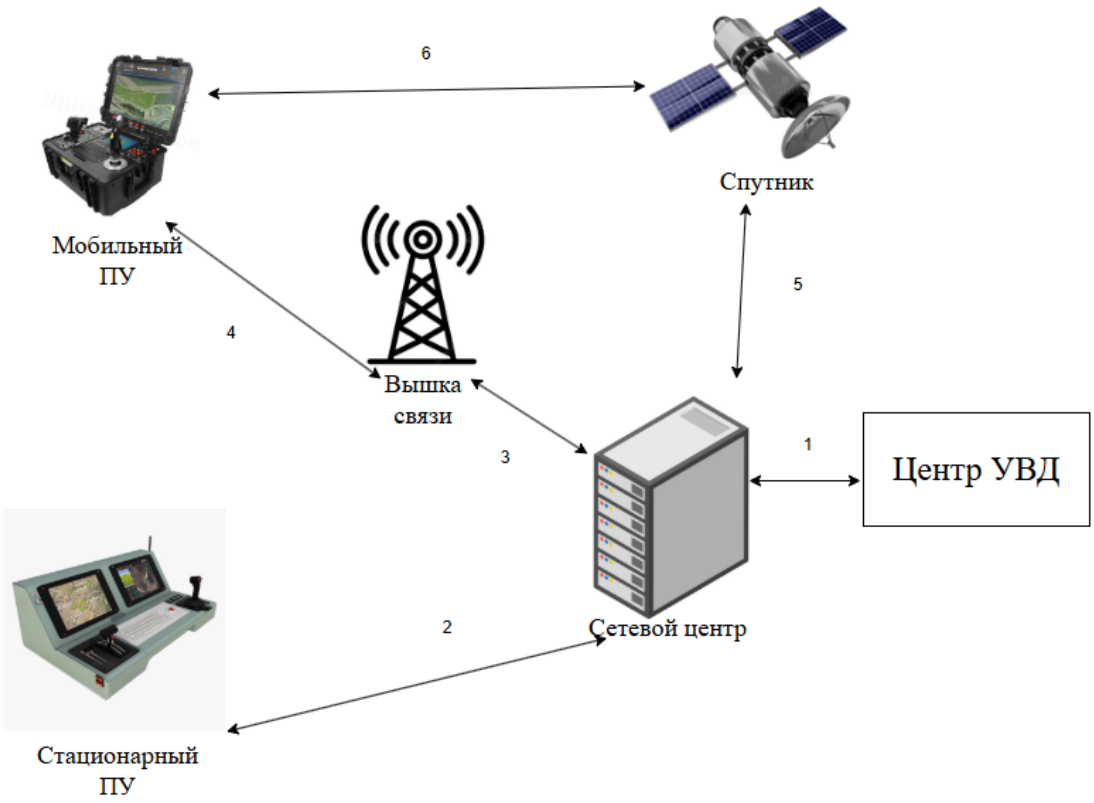


Рис. 4. Схема предлагаемого способа связи.

Предлагаемый вариант подразумевает использование коммерческих предприятий для передачи информации, что должно оптимизировать передачу данных и сделать этот способ экономически выгодным, так как используется имеющиеся инфраструктура как частных, так и государственных предприятий.

Достоинства:

- Высокая помехоустойчивость в отношении стационарных ПУ;
- Большая пропускная способность из-за использования современных сетей для передачи данных;
- Низкая задержка при передаче информации;
- Многоканальность в отношении мобильных ПУ, в случае недоступности одного из вариантов передачи данных или его резкого выхода из строя, автоматический переход на другой вариант передачи информации, без её потерь;
- Экономическая целесообразность, так как подразумевается использование уже имеющихся технологий и технических средств, как частных, так и государственных;

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

- Всепогодность.

Недостатки:

- Возможность перехвата передаваемой информации и ее подмена, в отношении мобильных ПУ, необходимо обеспечить защищенность и целостность информации;
- Слабая помехоустойчивость в отношении мобильных ПУ, применение современных средств РЭБ может нарушить передачу информации.

Заключение

Новый способ, предложенный авторами данной статьи, предназначен для передачи информации через современные сети передачи информации от центров УВД операторам БПЛА, как и на стационарные так и на мобильные пульты управления. Данный способ должен повысить безопасность и эффективность воздушного движения.

References

1. EUROCAE WG73 UAS - Concept of RPAS Required Communication Performance Methodology for the Command, Control and Communication Link. France, Malakoff, 2015.– 6 с.

2. Приложение №10 к Конвенции о международной гражданской авиации. Авиационная электросвязь. Том 6. Системы и правила связи, относящиеся к линии С2 дистанционно пилотируемых авиационных систем. Canada, Monreal. Издание первое, июль 2021 года, –I-1-1 с.

3. Приложение №10 к Конвенции о международной гражданской авиации. Авиационная электросвязь. Том 2. Правила связи, включая правила, имеющие статус PANS. Canada, Monreal. Издание шестое, июль 2001 года, –8-1 с.

4. Qi Chanying and Li Yuchao 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* **1883** 012176. Research of UAV Controller-pilot Data Link Real-time Processing Technique: Journal of physics, 2021. –2 с.

5. Прокофьева В.С., Пальмов С.В. Что такое 4G-сети и какие преимущества они нам дают. Журнал экономика и социум. Россия, Саратов. 2018. – 509 с.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

CONCLUSION

The materials of the International Journal of Professional Science No. 9(2) demonstrate a wide range of modern scientific and applied problems related to the development of infrastructure, industry and digital technologies. Research in the fields of construction, water supply, materials science and energy is aimed at improving the reliability of facilities and rational use of resources.

Of particular practical importance are works devoted to industrial audit, safety of mining enterprises, control of mineral reserves, reduction of production risks and prevention of downtime. The introduction of artificial intelligence, predictive analytics and robotic systems remains a promising direction, subject to taking into account environmental, technical and legal requirements.

Publications in the issue confirm the need for an integrated approach to solving modern problems. Their results can be useful to specialists in the field of construction, industry, transport, ecology, energy, information technology and scientific research, and also serve as the basis for further improvement of technological processes and management practices.

With best wishes and warm regards,
Editor-in-Chief
International Journal of Professional Science
Krasnova N.A.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Electronic scientific editions

International journal of Professional Science

international scientific journal
№9(2)/2026

Please address for questions and comments for publication as well as suggestions for cooperation to e-mail address mail@scipro.ru

ISSN 2542-1085

Format 60x84/16. Conventional printed sheets 9,1
Circulation 100 copies
Scientific public organization
“Professional science”