

MAY 2026 | ISSUE #5(2.2)

**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”, №5(2.2) - 2026. 212 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
Tsekoeva F.K., Pantiuchov A.V. Peculiarities of technical inventory of cultural heritage sites in the Russian Federation	7
ENVIRONMENT AND ECOLOGY	11
Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifullina I.Yu., Remizov N.A. Assessment of the Potential for Technogenic Geo-Resource Formation from Beneficiation Waste and the Environmental Prospects of Their Secondary Processing	11
Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Lomakina N.E., Dolbin I.D. Circular Economy in Mining: Processing Production Waste as a New Growth Point	19
Chernyatev I.Y., Tsekoeva F.K. Monitoring of agricultural land use in the Pravdinsky municipal district of the Kaliningrad region	25
Maslovsky I.Y., Tsekoeva F.K. Monitoring of the state of lands in the territory of the Curonian spit national park, located in the Kaliningrad region using the QGIS and grass GIS software	33
Tsekoeva F.K., Semenova D.V. Monitoring of agricultural land in the Bagrationovsky and Polesky municipal districts of the Kaliningrad region	40
Tsekoeva F.K., Shipov T.K. Protection and rational use of land resources in a municipality of the Kaliningrad region (a case study of the Chernyakhovsk urban district)	54
GEOGRAPHY AND ANTHROPOLOGY	67
Tsekoeva F.K., Prokopenko A.V. Analysis of agricultural development in the Nesterovsky municipal district of the Kaliningrad region	67
GEOLOGY AND GEOPHYSICS	71
Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Sharov P.E. Involvement of Sub-Standard Ores and Previously Left Pillars in Extraction within Caving Zones: Geomechanical Risk Assessment	71
Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Sharov P.E. Quantitative models for decision support in mine planning and assessment of subsurface investment attractiveness	77
Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Lomakina N.E., Sharov P.E. Assessment of Deformations of Quarry Walls and Waste Dumps Based on Real-Time Laser Scanning and Photogrammetry Data	88
Delitsyn L.L., Makeyeva L.I., Oreshin S.I., Tubanov T.A., Ochirova L.R. The structure of the upper mantle and mantle transition zone of the eastern part of the Central Asian fold belt based on seismic data	96
Gavrilov S.V. Semiempiric estimate of locations of prospective oil- and gas-bearing and metallogenic zones in the Northern Caucasus	110
INDUSTRIAL RESEARCH AND PRODUCTION	117
Andrianov V.I., Penzovskaya E.S. Intelligent tools in security systems from	117
Esmurziev I.I., Tsitskiev A.S., Vedzizhev A.I., Oligov M.I., Bariev M.B. Economic trade-off between drilling rate and CO ₂ emissions: constructing a trading curve for a rotary steerable system	123

Yandieva R.M., Khuchbarov M.B., Tsechoev K.I., Kartoev A.Y., Gadoborshev M.S. Optimal drilling rig fleet management in volatile oil prices: dynamic programming and real equipment replacement options.....	132
SCIENTIFIC METHODS AND TECHNOLOGIES.....	142
Soldatkin P.I., Mezentseva E.M. Application of approaches to expanding the context of large language models in systems with high requirements for the accuracy of relational knowledge extraction.....	142
Tsekoeva F.K., Pantiuchov A.V. Features of the use of unmanned aerial vehicles in cadastral activities in the Russian Federation.....	152
Tsekoeva F.K., Semenova D.V. Comprehensive cadastral works as an effective mechanism for the implementation of the "complete and accurate registry" project of the national spatial data system (using the Kaliningrad region as an example).....	156
SPACE TECHNOLOGY AND ENGINEERING	164
Lyakhov A.V., Kasyanenko N.G. Evaluation of power secrecy of a satellite communication system using computer modeling	164
STANDARDIZATION AND QUALITY.....	177
Kutsenko A. Architecture of a Prototype Lossless Hyperspectral Data Compressor.	177
Kutsenko A.A. Comparative analysis of lossless hyperspectral compression methods	185
Shitikova M.M., Platova R.A., Platov Y.T. Quality control of sunflower seeds using UV-VIS-NIR spectrometry.....	191
TRANSPORT AND MOBILITY.....	200
Ganchimeg J., Battur B., Dugerjav M. Feasibility study on reducing road congestion in Ulaanbaatar city.....	200
CONCLUSION.....	211

INTRODUCTION

International Journal Of Professional Science №5(2.2) – 2026 presents a diverse collection of research papers that reflect the wide range of contemporary scientific inquiry and applied professional practice. This issue brings together studies in architecture and construction, environment and ecology, geography and anthropology, geology and geophysics, industrial research and production, scientific methods and technologies, space technology and engineering, standardization and quality, and transport and mobility. The breadth of topics included in this volume demonstrates the journal's commitment to supporting interdisciplinary dialogue and to publishing work that addresses both theoretical questions and practical challenges of modern development.

A significant feature of this issue is the strong emphasis on environmental monitoring, land use assessment, and rational resource management. Several papers focus on the study of agricultural lands, protected territories, and municipal land resources, with particular attention to the use of geoinformation tools and digital spatial analysis. These contributions reflect the growing role of geographic information systems, remote sensing, and cadastral technologies in improving land administration, environmental protection, and territorial planning.

The issue also includes important research in geology and geophysics, where authors examine geomechanical risks, subsurface potential, deformation monitoring, and deep Earth structure. These studies are complemented by industrial and technological works devoted to drilling efficiency, emissions trade-offs, decision-making models, intelligent security systems, and the application of large language models in knowledge extraction tasks. Together, these papers illustrate how digital technologies, analytical modeling, and engineering innovation are reshaping industrial processes and scientific methods.

Special attention is also given to quality assurance, data compression, and transport systems. The articles in the field of standardization and quality demonstrate the importance of reliable methods for hyperspectral data processing and agricultural product control, while the transport study addresses a pressing urban challenge by exploring ways to reduce traffic congestion. In addition, the paper on satellite communication security and the study on unmanned aerial vehicles in cadastral activity highlight the expanding influence of advanced technologies in both spatial analysis and information systems.

Overall, International Journal Of Professional Science №5(2.2) – 2026 offers readers a well-balanced and timely selection of studies that combine scientific rigor with practical relevance. The papers published in this issue contribute to the advancement of knowledge across multiple disciplines and provide useful insights for researchers, engineers, planners, and practitioners seeking effective solutions to current professional and technological problems.

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

ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION

UDC 911.53+502.22+657.371(470)

Tsekoeva F.K., Pantiuchov A.V. Peculiarities of technical inventory of cultural heritage sites in the Russian Federation

Особенности технической инвентаризации объектов культурного наследия
в Российской Федерации

Tsekoeva Fatima Kaspolovna,

Candidate of agricultural sciences, Director of the scientific and educational center «Land management, cadastre and land monitoring», the head of educational programs of the direction «Land management and cadastres», Immanuel Kant Baltic Federal University

Pantiuchov Aleksandr Vladimirovich,

master's student in the field of «Land management and cadastres», Immanuel Kant Baltic Federal University, engineer of category I in the department of comprehensive cadastral works of federal significance at the Branch of PPK "Roskadast" in the Kaliningrad Oblast

Цекоева Фатима Касполовна,
к.с.-х., доцент, Директор НОЦ «Землеустройство, кадастры и мониторинг земель»,
руководитель образовательных программ направления «Землеустройство и кадастры, ФГАОУ
ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»
Пантюхов Александр Владимирович,
магистрант направления подготовки «Землеустройство и кадастры», ФГАОУ ВО «Балтийский
федеральный университет имени Иммануила Канта», инженер I категории отдела выполнения
комплексных кадастровых работ федерального значения Филиала ППК «Роскадастр» по
Калининградской области

Abstract. The article addresses the issues of technical inventorying of cultural heritage objects (CHOs) in the Russian Federation. It explores the concept and significance of the process, its role in preserving the authenticity of monuments, and the features of its implementation considering legislative frameworks, interdisciplinary approaches, and modern technologies such as laser scanning and 3D modeling. Special attention is given to documenting results and maintaining historical authenticity. The article analyzes existing challenges – including insufficient funding, a shortage of qualified specialists, and limited application of innovative methods – and proposes solutions to these problems. In conclusion, it emphasizes the importance of a comprehensive approach and the adoption of modern technologies for the effective preservation of Russia's cultural heritage.

Keywords: Cultural heritage object, technical inventory, monument preservation, modern technologies, restoration, cultural heritage protection

Аннотация. Статья посвящена вопросам технической инвентаризации объектов культурного наследия (ОКН) в Российской Федерации. В ней рассматриваются понятие и значение процесса, его роль в сохранении подлинности памятников, а также особенности проведения с учетом законодательной базы, междисциплинарного подхода и современных технологий, таких как лазерное сканирование и 3D-моделирование. Особое внимание уделяется задачам документирования результатов и сохранению исторической аутентичности объектов. В статье анализируются существующие проблемы – недостаточное финансирование, нехватка квалифицированных специалистов и ограниченное применение инновационных методов – а также предлагаются пути их решения. В заключение подчеркивается важность комплексного подхода и внедрения современных технологий для эффективного сохранения культурного наследия России.

Ключевые слова: объект культурного наследия, техническая инвентаризация, сохранение памятников, современные технологии, реставрация, охрана культурного наследия

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

Объекты культурного наследия (ОКН) занимают важное место в истории и культуре Российской Федерации. Их сохранение и эффективное использование требуют проведения технической инвентаризации — комплексного обследования, направленного на получение точных данных о состоянии, конфигурации и характеристиках объектов. Техническая инвентаризация ОКН является необходимым этапом для разработки программ реставрации, консервации и дальнейшего использования памятников архитектуры, истории и культуры.

Техническая инвентаризация — это процесс систематического сбора информации о конструктивных, инженерных и эксплуатационных характеристиках объекта. Для объектов культурного наследия она включает не только измерения и составление технической документации, но и оценку состояния материалов, выявление повреждений и деформаций, а также анализ историко-архитектурных особенностей.

Важность технической инвентаризации обусловлена необходимостью сохранения подлинности объекта, предотвращения утраты исторической информации и обеспечения безопасности эксплуатации. Полученные данные служат основой для принятия управленческих решений, разработки проектов реставрации и мониторинга состояния памятников.

Особенности проведения технической инвентаризации ОКН в РФ

1. Законодательная база

В Российской Федерации техническая инвентаризация объектов культурного наследия регулируется Федеральным законом № 73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации», а также рядом подзаконных актов и методических рекомендаций Министерства культуры РФ. Закон устанавливает требования к сохранению, учёту и охране памятников [1].

2. Комплексный подход

Техническая инвентаризация ОКН требует междисциплинарного подхода с участием архитекторов, инженеров, реставраторов, историков и других специалистов. Помимо стандартных геодезических измерений, проводится визуальный осмотр, фотодокументирование, лабораторные исследования материалов и конструкций [2].

3. Использование современных технологий

В последние годы активно внедряются цифровые методы инвентаризации: лазерное сканирование, фотограмметрия, 3D-моделирование. Эти технологии позволяют создавать точные цифровые копии объектов, что значительно повышает качество и скорость сбора данных, а также облегчает их хранение и анализ [3][4].

4. Сохранение исторической аутентичности

При проведении технической инвентаризации особое внимание уделяется сохранению оригинальных конструктивных элементов и материалов. Все работы должны минимально вмешиваться в структуру памятника, чтобы не нарушать его историческую ценность.

5. Документирование результатов

Результаты инвентаризации оформляются в виде технических паспортов, планов, чертежей и отчетов, которые включаются в государственный реестр объектов культурного наследия. Эти документы являются официальными источниками информации для органов охраны памятников и проектных организаций.

Проблемы и перспективы развития

Несмотря на значительный прогресс, процесс технической инвентаризации ОКН в России сталкивается с рядом проблем:

- Недостаточное финансирование реставрационных работ и обследований;
- Нехватка квалифицированных кадров;
- Ограниченное применение современных технологий в некоторых регионах;
- Сложности с доступом к объектам из-за их аварийного состояния или отсутствия

необходимой документации.

Для решения этих проблем необходимо совершенствовать нормативно-правовую базу, расширять подготовку специалистов, внедрять инновационные методы обследования и создавать централизованные базы данных.

Техническая инвентаризация объектов культурного наследия в Российской Федерации является ключевым этапом сохранения историко-культурного наследия страны. Комплексный и технологически оснащённый подход обеспечивает получение достоверной информации о состоянии памятников, что способствует их эффективной охране и рациональному использованию. Внедрение современных методов и повышение квалификации специалистов позволит повысить качество инвентаризации и сохранить уникальные объекты для будущих поколений.

References

1. Федеральный закон от 25.06.2002 № 73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» // Собрание законодательства РФ. — 2002. — № 26. — Ст. 2574.

2. Методические рекомендации по технической инвентаризации объектов культурного наследия / Министерство культуры Российской Федерации. — Москва, 2018. — 120 с.

3. Иванов С.В., Петрова Е.А. Современные технологии в технической инвентаризации памятников архитектуры // Вестник реставрации и охраны памятников. — 2020. — № 3. — С. 45–52.

4. Смирнов А.Н. Цифровые методы обследования исторических зданий // Архитектура и строительство России. — 2019. — Т. 15, № 7. — С. 33–39.

5. Кузнецова М.И., Лебедев В.П. Особенности сохранения аутентичности при реставрации объектов культурного наследия // Вестник культурного наследия. — 2021. — № 1. — С. 12–20.

6. ГОСТ Р 21.1101-2013 «Основные требования к проектной и рабочей документации» (с изменениями). — Москва: Стандартинформ, 2013.

ENVIRONMENT AND ECOLOGY

UDC 622.271:622.7:504.06

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifullina I.Yu., Remizov N.A. Assessment of the Potential for Technogenic Geo-Resource Formation from Beneficiation Waste and the Environmental Prospects of Their Secondary Processing

Оценка потенциала формирования техногенных георесурсов из отходов обогащения и экологические перспективы их вторичной переработки

Arno Veronika Vladimirovna

Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan

Kolesnichenko Eva Pavlovna

Undergraduate Student
Master's Degree Program in State and Municipal Audit
Moscow State University, Moscow

Garifulina Irina Yurievna,

Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan

Remizov Nikita Andreevich,

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 3 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
Ремизов Никита Андреевич,
Студент 3 курса

Политехнический институт
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет

Abstract. *The paper examines theoretical and methodological approaches to assessing the potential for technogenic geo-resource formation from ore beneficiation waste and analyses the environmental prospects of their secondary processing. A system of indicators is proposed, including the assessment of the volume and mass of accumulated tailings, the content of target components and their technological recovery rate, which is used to calculate the mineral potential of technogenic deposits. An economic model is developed to determine the overall effect of waste processing, taking into account revenue from secondary resource sales, processing costs and savings on environmental payments and land reclamation. The results show*

that under favourable technological and market conditions, secondary processing of beneficiation waste not only expands the mineral resource base but also significantly reduces environmental pressure by decreasing waste accumulation volumes and neutralising hazardous properties.

Keywords: *technogenic geo-resources, technogenic deposits, beneficiation waste, tailings, secondary processing, mineral potential, economic assessment, environmental effect, circular economy.*

Аннотация. *В статье рассматриваются теоретические и методические подходы к оценке потенциала формирования техногенных георесурсов из отходов обогащения руд и анализируются экологические перспективы их вторичной переработки. Предложена система показателей, включающая оценку объёма и массы накопленных хвостов, содержания целевых компонентов и коэффициента их технологического извлечения, на основе которой рассчитывается минеральный потенциал техногенных месторождений. Разработана экономическая модель, позволяющая определить совокупный эффект от переработки отходов с учётом выручки от реализации вторичных ресурсов, затрат на переработку и экономии на экологических платежах и рекультивации территорий. Показано, что при благоприятных технологических и рыночных условиях вторичная переработка отходов обогащения обеспечивает не только расширение минерально-сырьевой базы, но и значительное снижение экологической нагрузки за счёт уменьшения объёмов накопления отходов и нейтрализации их опасных свойств.*

Ключевые слова: *техногенные георесурсы, техногенные месторождения, отходы обогащения, хвосты, вторичная переработка, минеральный потенциал, экономическая оценка, экологический эффект, экономика замкнутого цикла.*

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

Введение

Рост потребности в металлах и минеральном сырье на фоне истощения традиционных месторождений делает актуальным вовлечение в эксплуатацию техногенных ресурсов, сформированных в результате длительной эксплуатации горнодобывающих и перерабатывающих предприятий. К таким ресурсам относятся техногенные месторождения и техногенные георесурсы, представленные отвальными породами, шлаками, шламами и, особенно, хвостами обогащения.[1-3]

Исследования показывают, что хвосты обогащения часто содержат значительные остаточные количества ценных компонентов, включая цветные и редкоземельные металлы, а также обладают физико-химическими свойствами, позволяющими использовать их как вторичное сырьё для производства строительных материалов и других продуктов. Вместе с тем длительное хранение хвостов в хвостохранилищах формирует долгосрочные экологические риски, связанные с загрязнением поверхностных и подземных вод, формированием пылевого загрязнения и деградацией земель.[3-4]

Цель работы – оценить потенциал формирования техногенных георесурсов из отходов обогащения и проанализировать экологические перспективы их вторичной переработки в контексте расширения минерально-сырьевой базы и снижения техногенной нагрузки на окружающую среду.

Методы

Теоретико-методологическая основа

Методологической основой исследования служат работы по техногенным месторождениям минерального сырья, техногенным вторичным ресурсам и концепции утилизации техногенных и металло-содержащих отходов. В частности, техногенные месторождения определяются как скопления техногенных образований, сформировавшиеся в результате складирования отходов добычи и переработки полезных ископаемых, с содержанием ценных компонентов, достаточным для экономически целесообразного извлечения.[3-4]

В основу оценки потенциала заложены принципы:

- комплексного использования минерального сырья, включая техногенные вторичные ресурсы;
- безотходных и малоотходных технологий;
- учёта полной экологической стоимости хранения и переработки техногенных образований.[4, 6-7]

Объект и информационная база

Объектом исследования являются отходы обогащения (хвосты) руд чёрных, цветных и редкометалльных металлов, накапливаемые в хвостохранилищах горнопромышленных предприятий. Информационная база включает:

- обзоры техногенных и вторичных золото- и металло-содержащих ресурсов.
- публикации по экологическим аспектам хранения хвостов обогащения.
- работы по техногенным месторождениям и техногенным вторичным ресурсам.
- исследования состава и свойств хвостов обогащения и возможностей их комплексной переработки.

Система показателей и расчётные зависимости

Для оценки потенциала техногенных георесурсов из хвостов обогащения используется следующая система показателей:

- объём накопленных хвостов V_t , м³;
- средняя плотность хвостов ρ_t , т/м³;
- масса хвостов M_t , т;
- среднее содержание целевых компонентов C_i (в долях единицы);
- коэффициент технологического извлечения η_i ;
- потенциально извлекаемый ресурс Q_i , т;
- стоимость ресурса R_i , руб.;
- интегральный показатель экологической опасности E_{ec} .

Масса хвостов определяется по формуле:

$$M_t = V_t \cdot \rho_t$$

Потенциально извлекаемый объём *i*-го компонента:

$$Q_i = M_t \cdot C_i \cdot \eta_i$$

При известной цене компонента P_i (руб./т) потенциальная выручка:

$$R_i = Q_i \cdot P_i$$

Экономический эффект переработки хвостов в год для всех компонентов:

$$E_{econ} = \sum_i R_i - C_{proc}$$

где C_{proc} – совокупные затраты на переработку (подготовка, переработка, реагенты, энергия, логистика).

Экологический эффект можно представить как:

$$E_{ecol} = C_{stor} + C_{rec} + C_{env}$$

где C_{stor} – затраты, избегаемые за счёт сокращения объёма хранения хвостов, C_{rec} – экономия на рекультивации, C_{env} – предотвращённые расходы (ущерб) от загрязнения окружающей среды.

Интегральный эффект переработки:

$$E_{tot} = E_{econ} + E_{ecol}$$

Результаты

Оценка минерального потенциала (пример расчёта)

Рассмотрим условный пример хвостохранилища обогатительной фабрики, сформированного за годы работы предприятия:

- объём хвостов $V_t = 8 \cdot 10^6 \text{ м}^3$;
- средняя плотность $\rho_t = 1,6 \text{ т/м}^3$;
- масса хвостов $M_t = 12,8 \cdot 10^6 \text{ т}$;
- среднее содержание меди $C_{Cu} = 0,25\% = 0,0025$;
- коэффициент извлечения меди $\eta_{Cu} = 0,6$;
- средняя цена меди $P_{Cu} = 800,000 \text{ руб./т}$ (условно);
- содержание сопутствующего компонента (например, молибдена) $C_{Mo} = 0,03\% = 0,0003$;
- коэффициент извлечения молибдена $\eta_{Mo} = 0,5$;
- цена молибдена $P_{Mo} = 3,000,000 \text{ руб./т}$ (условно).

Потенциал по меди:

- $Q_{Cu} = 12,8 \cdot 10^6 \cdot 0,0025 \cdot 0,6 = 19,200 \text{ т}$
- $R_{Cu} = 19,200 \cdot 800,000 = 15,36 \cdot 10^9 \text{ руб.}$

Потенциал по молибдену:

$$Q_{Mo} = 12,8 \cdot 10^6 \cdot 0,0003 \cdot 0,5 = 1,920 \text{ т}$$

$$R_{Mo} = 1,920 \cdot 3,000,000 = 5,76 \cdot 10^9 \text{ руб.}$$

Суммарная потенциальная выручка:

$$\sum_i R_i = 21,12 \cdot 10^9 \text{ руб.}$$

Допустим, совокупные затраты на переработку $C_{proc} = 14,0 \cdot 10^9$ руб., а экологический эффект (экономия на хранении, рекультивации и предотвращённом ущербе) оценивается в $E_{ecol} = 3,0 \cdot 10^9$ руб.

Тогда:

$$E_{econ} = 21,12 \cdot 10^9 - 14,0 \cdot 10^9 = 7,12 \cdot 10^9 \text{ руб.}$$

$$E_{tot} = 7,12 \cdot 10^9 + 3,0 \cdot 10^9 = 10,12 \cdot 10^9 \text{ руб.}$$

Это показывает, что при заданных параметрах переработка хвостов может обеспечить значительный совокупный эффект, сопоставимый с разработкой средних по запасам месторождений.[5-7]

Таблица 1.

Показатели потенциала и экологических эффектов (пример)

Показатель	Значение
Объём хвостов, V_t , млн м ³	8
Масса хвостов, M_t , млн т	12,8
Извлекаемая медь, Q_{Cu} , тыс. т	19,2
Извлекаемый молибден, Q_{Mo} , тыс. т	1,92
Потенциальная выручка, млрд руб.	21,12
Затраты на переработку, млрд руб.	14,0
Экологический эффект, млрд руб.	3,0
Интегральный эффект E_{tot} , млрд руб.	10,12

Экологические перспективы вторичной переработки

Снижение экологической опасности хранения хвостов

Хранение хвостов обогащения в хвостохранилищах сопровождается рисками загрязнения водных объектов, пылевыведения, нарушения ландшафтов и формирования техногенных геохимических аномалий. Экологические исследования показывают, что хвосты обогащения, особенно в горных регионах, создают специфические условия техногенного влияния на окружающую среду, требующие комплексной оценки и модернизации технологических процессов.[6-8]

Модернизация обогатительных процессов с включением стадий доизвлечения металлов и глубокой переработки хвостов позволяет не только использовать ранее потерянные компоненты, но и снижать токсичность и объём техногенных отложений, уменьшая нагрузку на экосистемы прилегающих территорий.[4-6]

Комплексная переработка и геоэкологический эффект.

Проекты комплексной переработки хвостов, реализуемые для хвостов лопаритовых и других редкометалльных руд, демонстрируют возможность получения нескольких видов кондиционных концентратов (лопаритового, нефелинового, полевошпатового, эгиринового и др.) при одновременном снижении техногенной нагрузки на окружающую среду. Комплексные технологии предполагают адаптацию флотационных и других методов обогащения к специфике техногенного сырья, учитывая вещественный состав, возраст и условия хранения хвостов.

Геоэкологический эффект включает:

- снижение загрязнения атмосферы (пылеподавление, консервация поверхностей хвостохранилищ);
- уменьшение инфильтрации загрязняющих веществ в грунтовые воды;
- возможность рекультивации и биологического восстановления техногенных ландшафтов.

Исследования микробиологического потенциала техногенных грунтов показывают, что при определённых условиях возможно формирование почвенного покрова и развитие растительности, что открывает перспективы природоподобной рекультивации и биоремедиации хвостохранилищ.[4]

Обсуждение

Рассмотренный подход к оценке потенциала техногенных георесурсов подтверждает выводы о том, что техногенные отходы являются важным резервом пополнения и укрепления минерально-сырьевой базы, особенно для цветной и редкометалльной металлургии. При этом хвосты обогащения часто более удобны для утилизации, чем отвалы вскрышных и вмещающих пород, поскольку они представляют собой уже дроблёный и относительно однородный материал.

Однако экономическая реализуемость проектов вторичной переработки сильно зависит от цен на металлы, масштабов хвостохранилищ, доступности технологий и инфраструктуры, а также от регуляторной среды и систем экологических платежей. В ряде случаев переработка хвостов может оказаться рентабельной только при учёте предотвращённого экологического ущерба и возможной государственной поддержки, что настоятельно подчёркивается в работах по концепции утилизации техногенных и металло-содержащих отходов.

Ключевым ограничением остаётся разнородность техногенного сырья, изменчивость вещественного состава в пространстве и времени, а также наличие опасных компонентов, требующих технологических решений, гарантирующих снижение токсичности конечных продуктов и остаточных материалов. Это требует разработки

комплексных схем переработки с учётом геоэкологических аспектов и оценки полного жизненного цикла продуктов и отходов.

Выводы

Техногенные георесурсы, сформированные из отходов обогащения, представляют собой значимый резерв расширения минерально-сырьевой базы, особенно в условиях роста спроса на цветные и редкоземельные металлы и истощения традиционных месторождений.

Предложенная система показателей и расчётных зависимостей позволяет количественно оценить минеральный потенциал хвостов обогащения и интегральный эффект их переработки, включающий как экономическую, так и экологическую составляющие.

Экологические перспективы вторичной переработки хвостов связаны с возможностью снижения токсичности и объёма техногенных отложений, уменьшения загрязнения вод и атмосферы, а также рекультивации техногенных ландшафтов при условии применения комплексных технологических схем и учёта геоэкологических факторов.

Реализация потенциала техногенных георесурсов требует интеграции усилий горнодобывающих и перерабатывающих предприятий, научных организаций и государства для разработки и внедрения технологических решений, учитывающих экономические, экологические и социальные аспекты устойчивого развития.

References

1. Рыльникова, М. В. Классификация техногенных георесурсов в свете перспектив комплексного освоения рудных месторождений / М. В. Рыльникова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М. : Горная книга, 2012. – № 2. – С. 43–48.
2. Трубецкой, К. Н. Эффективные технологии использования техногенных георесурсов – основа экологической безопасности освоения недр / К. Н. Трубецкой, В. Н. Захаров, Д. Р. Каплунов, М. В. Рыльникова // Горный журнал. – М. : Изд-во «Горная промышленность», 2016. – № 5. – С. 20–28. – DOI: 10.17580/gzh.2016.05.03.
3. Нуреев, Р. Р. Оценка воздействия отходов обогащения медных руд на поверхностные и подземные воды / Р. Р. Нуреев, М. А. Пашкевич, П. А. Харько // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12, № 4. – С. 169–179. – DOI: 10.46698/VNC.2022.37.95.013.
4. Гончар Н.В., Пикалов В.А., Соколовский А.В., Терешина М.А. Экологосбалансированная геотехнология освоения природных и техногенных

георесурсов. Горная промышленность. 2024;(4):68–73. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-68-73>

5. Перспективы переработки техногенных отходов и техногенных месторождений в РФ [Электронный ресурс] / ЗолотеХ. – М. : ЗолотеХ, 2026. – 6 мая. – Режим доступа: https://zolteh.ru/technology_equipment/perspektivy_pererabotki_tekhnogennykh_otkhodov_i_tekhnogennykh_mestorozhdeniy_v_rf/ (дата обращения: 20.05.2026).

6. Техногенные месторождения [Электронный ресурс] // Neftegaz.RU. – М. : Медиа-группа Neftegaz.RU, 2014. – Режим доступа: <https://neftegaz.ru/tech-library/mestorozhdeniya/142159-tekhnogennye-mestorozhdeniya/> (дата обращения: 20.05.2026).

7. Вадулина, Н. В. Разработка способа утилизации отходов горно-обогатительных комбинатов созданием активных фильтрующих обезжелезивающих материалов / Н. В. Вадулина, Н. Х. Абдрахманов, А. В. Федосов, И. И. Бадртдинова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 11. – С. 37–43.

8. Рубанов, Ю. К. Перспективы переработки горнопромышленных отходов в контексте устойчивого развития экономики / Ю. К. Рубанов, В. И. Михнев, К. Ли, Ю. С. Кузнецова // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2025. – Вып. 3. – С. 17–23.

UDC 622.33:628.4:338.45

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Lomakina N.E., Dolbin I.D. Circular Economy in Mining: Processing Production Waste as a New Growth Point

Экономика замкнутого цикла в горнодобыче: переработка отходов производства как
новая точка роста

Arno Veronika Vladimirovna

Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan

Kolesnichenko Eva Pavlovna

Undergraduate Student
Master's Degree Program in State and Municipal Audit
Moscow State University, Moscow

Lomakina Natalia Evgenievna,

Senior Lecturer of the Department of Hygiene and Public Health,
Senior Lecturer of the Department of ETS,
North-Eastern Federal 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 3 курса

направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит»
ВШГА МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Ломакина Наталья Евгеньевна,
Старший преподаватель кафедры ГиГД
ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Долбин Иван Дмитриевич,
Студент 3 курса

Политехнический институт
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет

Abstract. *The paper examines the application of circular economy principles to the mining industry of the Magadan Region using the case of processing waste from gold ore deposits. The study analyses the structure of beneficiation tailings and overburden rocks and develops a system of indicators to assess the recycling rate, resource productivity and economic effect of involving technogenic geo-resources in secondary use. A calculation model is proposed to evaluate scenarios of increasing the share of waste recycling up to 2030 and to estimate their impact on the economic and environmental performance of the region. The results show that processing waste from gold mining can become a new growth point for the regional economy by reducing the volume of waste disposal, decreasing environmental risks and generating additional revenue streams. Key barriers to the implementation of a circular economy are identified, and directions for the development of cluster approaches and industrial symbiosis to improve the efficiency of technogenic resource use are suggested.*

Keywords: circular economy, mining industry, Magadan Region, gold ore deposits, beneficiation waste, technogenic geo-resources, waste recycling, recycling rate, economic assessment, environmental effect.

Аннотация. В работе рассматривается применение принципов экономики замкнутого цикла к горнодобывающей отрасли Магаданской области на примере переработки отходов золоторудных месторождений. Проведён анализ структуры отходов обогащения и вскрышных пород, сформирована система показателей оценки коэффициента рециклинга, ресурсной продуктивности и экономического эффекта от вовлечения техногенных георесурсов во вторичный оборот. Предложена расчётная модель, позволяющая оценивать сценарии роста доли переработки отходов до 2030 года и их влияние на экономические и экологические показатели региона. Показано, что переработка отходов золоторудной добычи может стать новой точкой роста региональной экономики за счёт снижения объёмов захоронения, сокращения экологических рисков и формирования дополнительных потоков доходов. Сформулированы ключевые барьеры реализации экономики замкнутого цикла и предложены направления развития кластерного подхода и промышленного симбиоза для повышения эффективности использования техногенных ресурсов.

Ключевые слова: экономика замкнутого цикла, горнодобывающая промышленность, Магаданская область, золоторудные месторождения, отходы обогащения, техногенные георесурсы, переработка отходов, коэффициент рециклинга, экономическая оценка, экологический эффект.

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

Введение

Магаданская область является одним из ключевых центров золотодобычи России, где сосредоточены значительные ресурсы золоторудных и золото-серебряных месторождений. Интенсивное развитие добычи сопровождается образованием крупных объёмов отходов — вскрышных пород, хвостов обогащения, шламов, что формирует техногенные месторождения и усиливает экологическую нагрузку на регион. Традиционная линейная модель недропользования, основанная на последовательности "добыча–переработка–захоронение", приводит к накоплению отходов, росту затрат на их размещение и рекультивацию и не позволяет реализовать потенциал отходов как вторичного ресурса.

Концепция экономики замкнутого цикла предлагает альтернативный подход, предполагающий максимальное вовлечение отходов в хозяйственный оборот, снижение объёмов захоронения и создание добавленной стоимости за счет вторичных материальных ресурсов [1-3].

Методы

Методологической основой исследования являются концепции экономики замкнутого цикла и циркулярной экономики, а также подходы к оценке эффективности использования ресурсов и управления отходами в горнодобывающей отрасли [3-5]. В работе используется системный подход, при котором золоторудные предприятия Магаданской области рассматриваются как элементы регионального промышленного кластера, где отходы добычи и обогащения выступают как вторичные ресурсы.

Применяются методы статистического и сравнительного анализа, экономико-математического моделирования сценариев роста доли переработки отходов, а также элементы экспертных оценок для определения барьеров и перспектив развития переработки.

Система показателей и формулы оценки

Коэффициент рециклинга отходов горнодобычи определяется как:

$$r = R_r / R_a$$

где r — доля переработанных отходов; R_r — объем отходов, направленных на переработку; R_a — общий объем образующихся отходов [4, 6].

Показатель ресурсной продуктивности на уровне региона можно представить в виде:

$$RP = GRP / DMC$$

где GRP — валовой региональный продукт; DMC — внутрирегиональное потребление материалов.

Экономический эффект от переработки отходов оценивается по формуле 2:

$$E = R_r \cdot P_s - C_r \quad 2.$$

где E — годовой экономический эффект; P_s — средняя цена вторичного сырья; C_r — совокупные затраты на сбор, переработку и логистику.

Результаты

Структура отходов золоторудной добычи Магаданской области включает вскрышные и вмещающие породы, хвосты обогащения, шламовые и пылевые отходы, а также эксплуатационные и буровые отходы. Наибольший объем приходится на вскрышные породы и хвосты обогащения, которые обладают значительным потенциалом использования в качестве сырья для производства строительных материалов, рекультивации нарушенных земель и частичного вторичного извлечения компонентов [7-8]. Обобщенная структура отходов и потенциальные направления их использования представлены в таблице 1.

Таблица 1

Структура отходов и потенциальные направления использования

Вид отходов	Основные источники	Потенциал использования	Ключевые барьеры
Вскрышные и вмещающие породы	Карьеры золоторудных месторождений	Щебень, заполнители, рекультивационные смеси	Отдаленность рынков сбыта, транспортные издержки
Хвосты обогащения золоторудных руд	Обогатительные фабрики	Сырье для цемента и строительных материалов, вторичное извлечение золота	Сложный состав, необходимость обезвреживания

Вид отходов	Основные источники	Потенциал использования	Ключевые барьеры
Шламы и пылевые отходы	Дробильно-сортировочные и обогатительные комплексы	Добавки к строительным материалам, вторичное сырье	Технологическая сложность переработки
Отходы бурения и эксплуатационные отходы	Разведка, добыча, вспомогательные службы	Строительство дорог, рекультивация, стандартные потоки переработки	Классы опасности, разобщенность потоков

Оценка потенциала переработки отходов в логике экономики замкнутого цикла позволяет сформировать сценарий роста доли переработки отходов золоторудной добычи в Магаданской области. В таблице 2 приведена ориентировочная динамика коэффициента рециклинга на период до 2030 года.

Таблица 2

Год	Доля переработки отходов, %
2020	5–7
2024	10–12
2026	15–18
2030	25–30

График динамики (рис.1) доли переработки отходов, показывающий постепенное увеличение коэффициента рециклинга. Линейный характер роста доли переработки отражает поэтапное внедрение технологий переработки отходов, развитие инфраструктуры вторичных ресурсов и усиление регуляторных стимулов в рамках федерального проекта "Экономика замкнутого цикла".

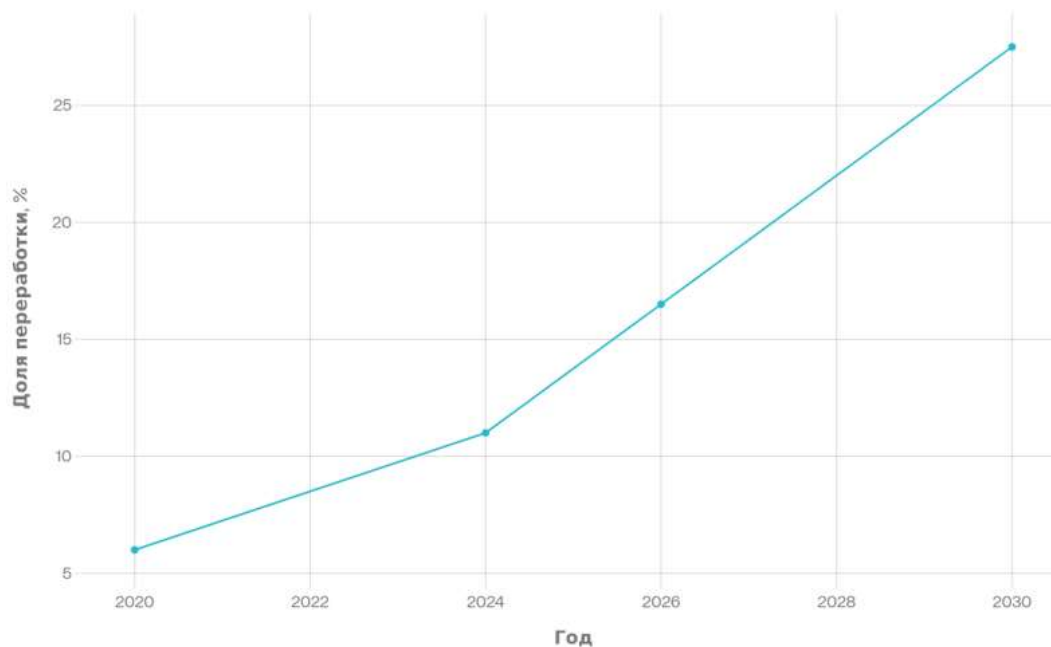


Рисунок 1 - График динамики (рис.1) доли переработки отходов

Экономический эффект от внедрения экономики замкнутого цикла в золоторудной отрасли Магаданской области складывается из прямых доходов от реализации вторичных материалов, экономии затрат на размещение и рекультивацию отходов, снижения экологических платежей и косвенных эффектов в виде создания рабочих мест и развития инфраструктуры. Использование формулы $E = Rr \cdot Ps - Cr$ позволяет оценить результативность проектов переработки в разных сценариях в зависимости от доли переработки, цен на вторичное сырье и затрат на переработку. В условиях удаленности Магаданской области и ограниченности транспортной инфраструктуры особое значение имеет интеграция перерабатывающих мощностей с существующими добывающими предприятиями и развитие регионального рынка строительных материалов из отходов.

Обсуждение

Полученные результаты показывают, что при достижении доли переработки отходов золоторудной добычи на уровне 25–30 % к 2030 году Магаданская область сможет существенно снизить объемы захоронения отходов и уменьшить площадь нарушенных земель. Однако реализация такого сценария требует преодоления ряда барьеров: высокой капиталоемкости перерабатывающих технологий, географической удаленности региона, ограниченности транспортной инфраструктуры и недостаточной развития нормативных механизмов, стимулирующих использование вторичных ресурсов [8-10].

Перспективным направлением является создание промышленных кластеров, в которых золоторудные предприятия, строительные организации и переработчики отходов образуют единый комплекс замкнутого ресурсного цикла.

Выводы

Экономика замкнутого цикла в горнодобывающей отрасли Магаданской области способна трансформировать отходы золоторудных месторождений из источника экологических рисков и затрат в стратегический ресурс регионального развития. Переработка вскрышных пород и хвостов обогащения позволяет формировать дополнительные потоки доходов, повышать ресурсную продуктивность и уменьшать негативное воздействие на окружающую среду. Разработанная система показателей и предложенные формулы оценки экономического эффекта могут быть использованы для обоснования инвестиционных решений и формирования региональной политики в области устойчивого недропользования. Для магистерского исследования дальнейшее развитие темы связано с уточнением расчетов на основе детализированных статистических данных, моделированием нескольких сценариев развития и включением оценки социально-экологических эффектов.

References

1. Экономика замкнутого цикла и линейная экономика // Экономика устойчивого развития: учебник / под ред. С. Н. Бобылёва. – М.: Экономический факультет МГУ, 2024. – Гл. 9.1.
2. Дапкюнас, Л. Экономика замкнутого цикла и другие стратегии в контексте устойчивого развития / Л. Дапкюнас. – Минск: БГУ, 2020. – 148 с.
3. Евразийская экономическая комиссия. Экономика замкнутого цикла в системе устойчивого развития: отчёт по НИР / Евразийская экономическая комиссия. – М., 2021. – 140 с.
4. Экономика замкнутого цикла и ресурсосберегающие процессы в промышленности: сб. науч. тр. – СПб.: Университет ИТМО, 2021. – 220 с.
5. Экономика замкнутого цикла – циркулярные образы будущего // Экономическая политика. – 2023. – Т. 18, № 5. – С. 130–151.
6. Хоружий, Л. И. Экономика замкнутого цикла в системе устойчивого развития сельскохозяйственных организаций / Л. И. Хоружий, Ю. Н. Катков, Е. А. Каткова и др. // Экономика сельского хозяйства России. – 2024. – № 1. – С. 106–110.
7. Яньшин, А. Н. Исследование экономики замкнутого цикла и её роли в устойчивом развитии регионов / А. Н. Яньшин // Дневник науки. – 2025. – Т. 2, № 2. – С. 45–54.
8. Экономика замкнутого цикла [Электронный ресурс] // Кузбасский экологический портал. – 2022. – Режим доступа: <https://kuzbasseco.ru/2022/11/28/ekonomika-zamknutogo-cikla/> (дата обращения: 20.05.2026).
9. Экономика замкнутого цикла: новый рейтинг регионов [Электронный ресурс] // Infragreen. – 2025. – 26 июля. – Режим доступа: <https://infragreen.ru/circular-economy-ranking/> (дата обращения: 20.05.2026).
10. Экономика замкнутого цикла: настоящее и будущее [Электронный ресурс] // Журнал компании «СИБУР». – 2020. – Режим доступа: <https://magazine.sibur.ru/publication/trends/ekonomika-zamknutogo-tsikla-nastoyashchee-i-budushchee/> (дата обращения: 19.05.2026).

UDC 502.5+332.3+631.11(470.26)

Chernyatev I.Y., Tsekoeva F.K. Monitoring of agricultural land use in the Pravdinsky municipal district of the Kaliningrad region

Мониторинг использования земель сельскохозяйственного назначения в
МО «Правдинский муниципальный округ» Калининградской области

Chernyatev Igor Yurevich,

Master's student of the direction «Land management and cadastres», program «Real estate cadaster», Immanuel Kant Baltic Federal University

Tsekoeva Fatima Kaspolovna,

Candidate of agricultural sciences, Director of the scientific and educational center «Land management, cadastre and land monitoring», the head of educational programs of the direction «Land management and cadastres», Immanuel Kant Baltic Federal University

Чернятьев Игорь Юрьевич,
магистрант первого года обучения направления «Землеустройство и кадастры»,
программа «Кадастр недвижимости», ФГАОУ ВО Балтийский федеральный университет имени
Иммануила Канта,
Цекоева Фатима Касполовна,
к.с.-х., доцент, Директор НОЦ "Землеустройство, кадастры и мониторинг земель",
руководитель образовательных программ направления "Землеустройство и кадастры, ФГАОУ
ВО Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта

Abstract. *The purpose of the study is to monitor the use of agricultural land in the territory of the Pravdinsky Municipal District using satellite images processed in the QGIS and GRASS GIS programs.*

The monitoring of the lands of the Pravdinsky district in the Kaliningrad region was carried out on the basis of publicly available Landsat images, and two images were selected for the study – for 2015 and 2024.

The images obtained showed the existence of a balanced and thoughtful approach to agricultural land use in the area.

Keywords: *land categories, agricultural lands, monitoring of land use, satellite image processing in QGIS, classification of images in GRASS GIS, environmental protection, agronomic strategy, forecasting yields, agricultural land productivity, land resources management.*

Аннотация. *Целью исследования является проведение мониторинга использования земель сельскохозяйственного назначения на территории МО «Правдинский муниципальный округ» Калининградской области при помощи космических снимков, обрабатываемых в программах QGIS и GRASS GIS.*

Мониторинг земель Правдинского района в Калининградской области проводился на основе общедоступных снимков Landsat, для исследования было выбрано два снимка – за 2015 год и 2024 год.

Полученные снимки показали наличие сбалансированного и продуманного подхода к сельскохозяйственному использованию земель в данном районе.

Ключевые слова: *категории земель, земли сельскохозяйственного назначения, мониторинг использования земель, обработка космических снимков в QGIS, классификации изображений в GRASS GIS, охрана окружающей среды, агрономическая стратегия, прогнозирование урожайности, продуктивность сельскохозяйственных угодий, управление земельными ресурсами.*

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

Правдинский муниципальный округ находится на юго-западе Калининградской области, его территория пересекается рекой Лава (приток Преголи) и Мазурским каналом. Он граничит с Польшей на протяжении 55 км. Границы Правдинского муниципального округа общей протяженностью около 180 км включают участки,

смежные с другими муниципальными образованиями: с Багратионовским городским округом – 30,2 км, с Гвардейским городским округом – 50,5 км, с Черняховским городским округом – 21,2 км, с Озерским городским округом – 19,5 км, а также с территорией Республики Польша – 55 км.



Рисунок 1. Правдинский муниципальный округ на карте Калининградской области [1]

Правдинский муниципальный округ охватывает территорию площадью 128,4 тыс. га, что составляет 8,5% общей площади Калининградской области.

Распределение категорий земель в данном муниципальном образовании представлено в табличной форме. Таблица составлена на основе карты градостроительного зонирования «Правила землепользования и застройки муниципального образования «Правдинский муниципальный округ» [1].

Таблица 1.

Категории земель МО «Правдинский муниципальный округ»

№ п/п	Категория земель	Площадь	
		га	%
1	Земли сельскохозяйственного назначения	74241	59,3
2	Земли населенных пунктов	7010	5,6
3	Земли промышленности, энергетики транспорта, связи, радиовещания, телевидения, информатики, земли для обеспечения космической деятельности, земли обороны, безопасности и земли иного специального назначения	20948	16,7
4	Земли особо охраняемых территорий и объектов	42	0,03
5	Земли лесного фонда	23998	18,7
6	Земли водного фонда	1786	1,4
7	Земли запаса	363	0,3
	Общая площадь земель в границах муниципального образования	128388	100

Как видно из таблицы основная часть территории муниципального образования занята землями сельскохозяйственного и лесного назначения, в то время как земли особо охраняемых территорий и объектов занимают минимальную долю.

Площадь сельскохозяйственных угодий в Правдинском муниципальном округе составляет 67646 гектаров. Разделение на виды сельскохозяйственных угодий следующее: пашни занимают 34580 гектаров (51,22%), пастбища - 23034 гектара (34,47%), сенокосы - 9769 гектаров (14,12%) и многолетние насаждения - 126 гектаров (0,19%).

При помощи космических снимков проведен мониторинг использования земель сельскохозяйственного назначения на территории МО «Правдинский муниципальный округ»

Мониторинг земель Правдинского района в Калининградской области проводился с использованием программного обеспечения QGIS 3.40 и GRASS GIS 8.4.0 на основе общедоступных снимков Landsat [2]. В данной работе использовались два снимка – за 2015 год и 2024 год.



Рисунок 2. Снимок с Landsat за 09.30 2015 года [2]



Рисунок 3. Снимок с Landsat за 05.17 2024 года [2]

Важным фактором в данном исследовании являлся подбор качественных снимков и выбор площади исследования.

В ходе исследования были выполнены следующие работы:

- Выбор объекта исследования;
- Подбор подходящего снимка;
- Импорт данных, экспорт данных в GRASS;
- Классификация;
- Пост классификация;
- Векторизация;
- Сравнение снимков в QGIS;
- Обоснование полученных результатов.

В начале работы исследуемые снимки были загружены в QGIS для цветокоррекции отображения снимков. В GRASS GIS снимки загружались для их перевода в необходимый для работы формат - tiff, для дальнейшего проведения их классификации.

Процесс классификации изображений в программе GRASS GIS с использованием методов без обучения представляет собой важный этап в анализе данных удаленного зондирования. Классификация без обучения означает автоматическую группировку пикселей в классы на основе их спектральных характеристик. Это позволяет выделять различные типы объектов на изображении, такие как сельскохозяйственные культуры, водные поверхности, лесные массивы и другие элементы ландшафта.

При создании группы и подгруппы снимков до начала классификации важно учитывать несколько ключевых факторов. Прежде всего, необходимо правильно определить количество классов, что в данной работе составляло 15. Это число напрямую влияет на качество разделения объектов и интерпретируемость результатов. Слишком большое количество классов может привести к дроблению объектов, в то время как слишком малое объединит различающиеся поверхности в одни и те же классы, что затруднит дальнейший анализ.

Степень интерпретируемости полученного классифицированного изображения также зависит от характеристик местности. Например, в регионах с однородными ландшафтами и растительностью классы могут быть более четко выделены. Однако на территориях с разнообразием типов земель использование одинакового количества классов может создать путаницу в интерпретации данных. Поэтому выбор параметров классификации, включая пороговые значения для кластеризации, может потребовать значительных экспериментов и испытаний.

Необходимо отметить что использование дополнительных вегетационных индексов, таких как NDVI, может помочь увеличить точность классификации. Эти индексы позволяют отделить растительность от других объектов на земле, а также

служить дополнением к базовым спектральным характеристикам, что в конечном итоге улучшает различение классов. После завершения классификации результаты анализа могут быть использованы для дальнейших исследований и принятий решений о землевладении, управлении ресурсами и охране окружающей среды.

Земли сельскохозяйственного назначения на изображениях, полученных в программе GRASS GIS, обозначены желтым и светло-зеленым (салатовым) цветом.

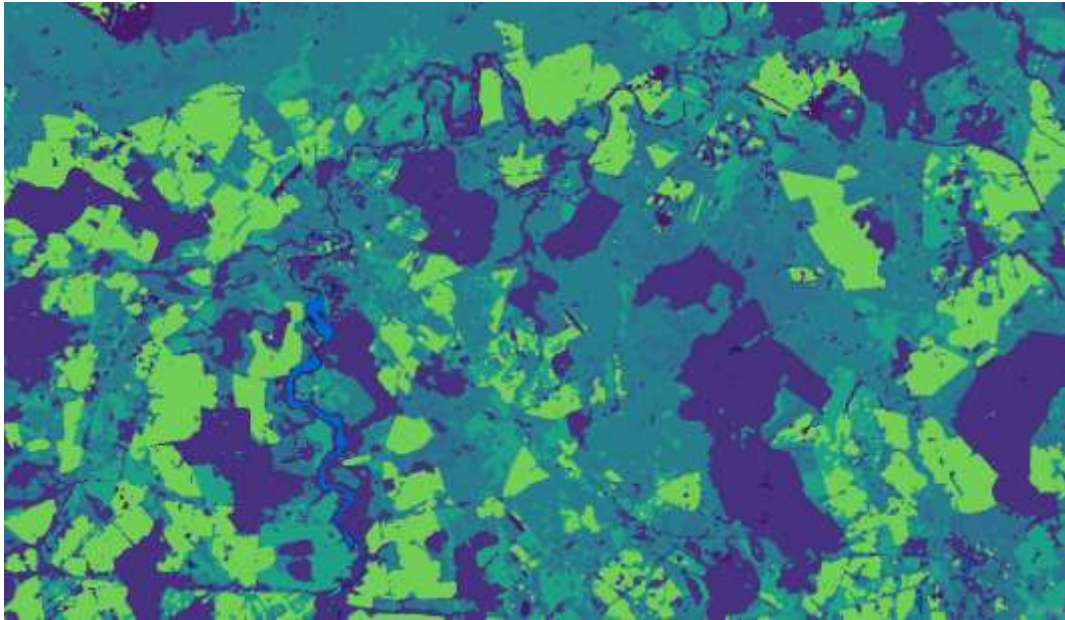


Рисунок 4. Результат объединения классов Лес и СХ земли в разные группы (2015г)

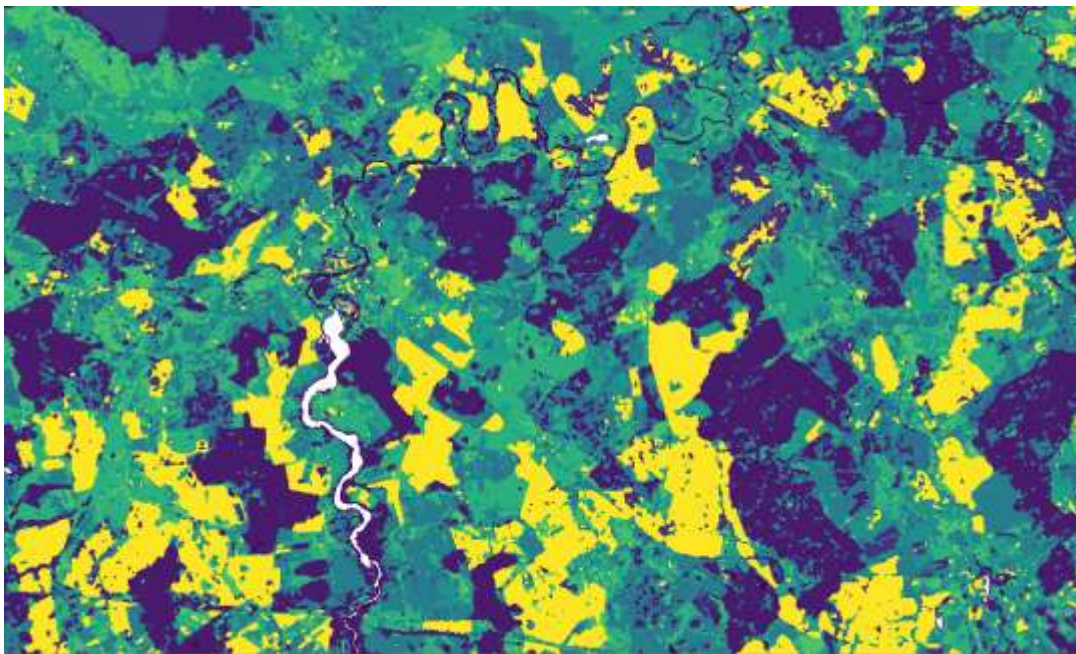


Рисунок 5. Результат объединения классов Лес и СХ земли в разные группы (2024г)

Анализ использования земель сельскохозяйственного назначения на представленных изображениях может дать ценную информацию о распределении и характере сельскохозяйственных угодий в данном районе.

На **рисунке 4** желтые участки могут указывать на земли, используемые для выращивания определенных культур, тогда как светло-зеленые области могут обозначать низкорослые культуры или пашни, находящиеся в стадии роста. Сравнительно яркие цвета могут также указывать на участки с высокой продуктивностью или интенсивным земледелием. Четкое различие между этими цветами позволяет оценить разнообразие используемых культур и провести мониторинг их состояния.

На **рисунке 5** желтые области могут обозначать более зрелые или созревающие культуры, в то время как светло-зеленые участки могут указывать на менее интенсивные земли или участки, которые недавно подверглись обработке.

Анализ распределения сельскохозяйственных земель также может включать оценку фрагментации земель. Если желтые и светло-зеленые участки распределены равномерно и имеют смешанную структуру, это может указывать на интегрированное ведение хозяйства, тогда как изолированные участки могут свидетельствовать о недостаточной агрономической стратегии, что может привести к снижению устойчивости и продуктивности.

Используя эти карты, можно также провести более детальное моделирование, включая прогнозирование урожайности на основе временных изменений в использовании земель, а также оценку воздействия климатических факторов и изменений в использовании земель на продуктивность сельскохозяйственных угодий. Это важно для планирования устойчивого сельского хозяйства и эффективного управления земельными ресурсами.



Рисунок 6. Фактические контуры полей в прогнозе на 2026 год

Анализируя представленные снимки, можно наблюдать устойчивое развитие и использование земель сельскохозяйственного назначения в данном районе. Эти данные свидетельствуют о том, что в регионе активно практикуется паровое земледелие, при котором земли с различной периодичностью отправляются в «пар». Данный подход способствует восстановлению плодородия почвы и оптимизации аграрной деятельности.

Наличии залежей свидетельствует о том, что на некоторых участках наблюдается временное прекращение сельскохозяйственной эксплуатации. Это может быть частью стратегии управления землей, направленной на поддержание экосистемной устойчивости и улучшение качества почв.

В целом, данные снимки подтверждают наличие сбалансированного и продуманного подхода к сельскохозяйственному использованию земель в данном районе.

References

1. Официальный сайт Администрации МО «Правдинский муниципальный округ» Калининградской области - URL: <https://admpravd.ru/> (дата обращения: 19.02.2025). – Текст: электронный.
2. Центр наблюдения и науки о ресурсах Земли (EROS) - URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 20.02.2025). – Текст: электронный.
3. Система поддержки анализа географических ресурсов (GRASS GIS) - URL: <https://grass.osgeo.org/about/> (дата обращения: 20.02.2025). – Текст: электронный.

UDC 502.5+332.3+528.4(470.26)

Maslovsky I.Y., Tsekoeva F.K. Monitoring of the state of lands in the territory of the Curonian spit national park, located in the Kaliningrad region using the QGIS and grass GIS software

Мониторинг состояния земель на территории национального парка «Куршская коса», расположенного на территории Калининградской области с использованием программного обеспечения «QGIS» и «GRASS GIS»

Maslovsky Ilya Y.,

2nd year full-time Master's student in Land Management and Cadastre, Immanuel Kant Baltic Federal University.

Tsekoeva Fatima Kaspolovna,

Candidate of agricultural sciences, Director of the scientific and educational center "Land management, cadastre and land monitoring", the head of educational programs of the direction "Land management and cadastres", Immanuel Kant Baltic Federal University

Масловский Илья Юрьевич,

магистрант 2-го курса очной формы обучения направления «Землеустройство и кадастры», ФГАОУ ВО Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта.

Цекоева Фатима Касполовна,

к.с.-х., доцент, Директор НОЦ "Землеустройство, кадастры и мониторинг земель", руководитель образовательных программ направления "Землеустройство и кадастры, ФГАОУ ВО Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта

Abstract. National parks belong to specially protected natural areas of federal importance. The main objectives of this category of specially protected natural area are the conservation of valuable ecosystems, monitoring and scientific activities, as well as the development of environmental education and tourism. Thus, the national park faces contradictory goals, the combination of which is possible only with a clear division of environmental management in specially designated areas.

Keywords: land monitoring, Curonian Spit National Park, QGIS and GRASS GIS software.

Аннотация. Национальные парки относятся к особо охраняемым природным территориям федерального значения. Основные задачи этой категории особо охраняемой природной территории – сохранение ценных экосистем, мониторинг и научная деятельность, а также развитие экологического просвещения и туризма. Таким образом, перед национальным парком стоят противоречивые цели, совмещение которых возможно только при четком разделении природопользования на специально выделенных участках.

Ключевые слова: мониторинг земель, Национальный парк «Куршская коса», программное обеспечения «QGIS» и «GRASS GIS».

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

Материалы и методика исследования. Общая площадь национального парка Куршская коса — 6621 га. Это самый маленький национальный парк в России. Соотношение высокой протяженности границ Куршской косы и ее расчлененность при сравнительно небольшой площади обуславливают уязвимость национального парка, его природные комплексы

неустойчивы к внешним воздействиям — так называемый краевой эффект осложняет управление им и охрану. [1]



Рисунок 1. Снимок Куршской косы, сделанный спутником «Терра» летом 2006 года. [2]

В национальном парке «Куршская коса» реализуется комплексный экологический мониторинг природных комплексов, в основе которого лежит применение данных дистанционного зондирования и географических информационных систем (ГИС), использование которых способствует оперативному выявлению негативных изменений в экосистемах. Это дает возможность определить степень их сохранности и проанализировать соответствие установленным критериям, показателям рационального лесопользования, а также сформировать наглядную картину динамики лесных экосистем в пространственном масштабе. [1]

Мониторинг состояния земель на территории национального парка «Куршская коса» проводился с использованием программного обеспечения QGIS

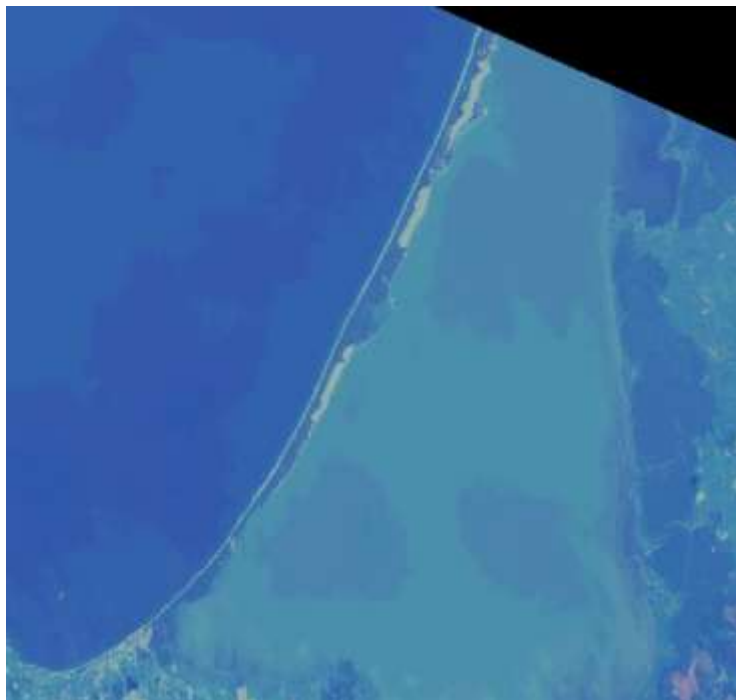


Рисунок 2 – Снимок Landsat-8 за 2014

3.10 и GRASS GIS 7.4 на основе общедоступных снимков на сайте <https://glovis.usgs.gov/app> с пятилетней разницей – за 2014, 2020, 2024 года.

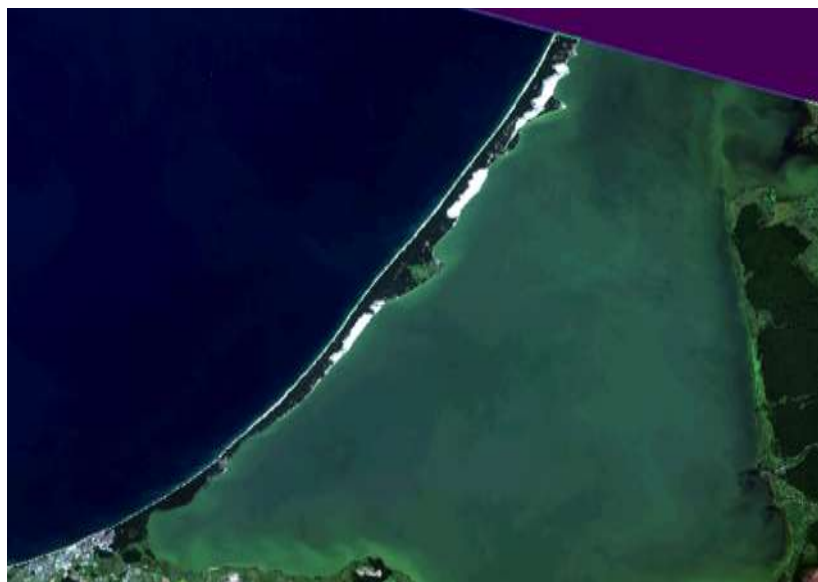


Рисунок 3 – Снимок Landsat-8 за 2020 год.

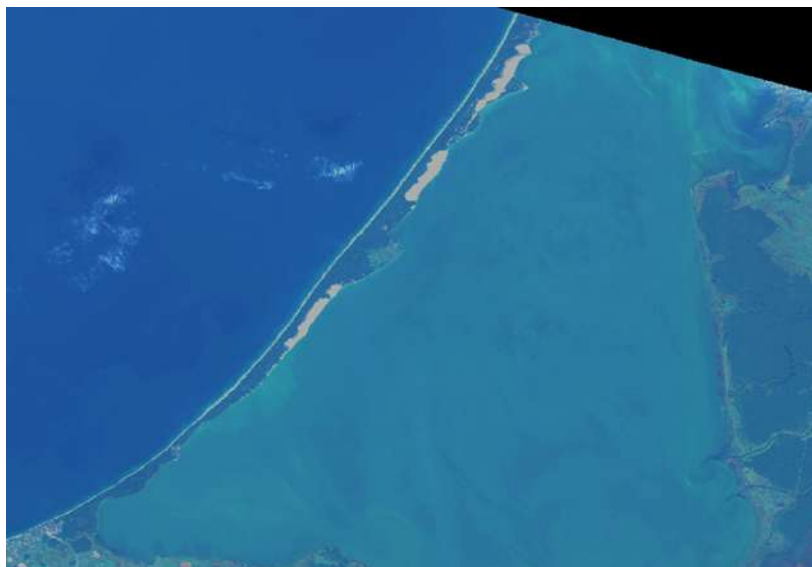


Рисунок 4 – Снимок Landsat-8 2024 год.

В начале процесса обработки была проведена классификация снимков без обучения в программе GRASS GIS 7.4, для чего была создана группа и подгруппа снимков, на основе которых осуществлялась классификация. Этот процесс основан на автоматической кластеризации объектов со сходными спектральными характеристиками, которые объединяются в один класс, при этом число классов задается пользователем.

Алгоритм принимает на вход необходимое количество классов и делит изображение на группы с однородной текстурой в рамках заданного порога, что позволяет определить объекты с похожими характеристиками в один класс.

Далее следует объединение классов в группы с идентичными спектральными характеристиками с использованием модуля «Классификация максимального подобия», после чего выполняется постклассификация, представляющая собой необязательный, но рекомендованный этап для очистки изображения, сглаживания углов объектов и устранения шумов. Завершающим этапом является преобразование раstra в векторный формат с помощью модуля [r.to.vect], что позволяет преобразовать файлы классификации, а также выделенные области воды и облаков, в векторные данные для дальнейшего анализа.

Далее происходит оформление макетов карт в программе QGIS 3.10, с использованием модуля GRASS 7. Данный модуль позволит преобразовать векторные файлы в файлы формата shp.

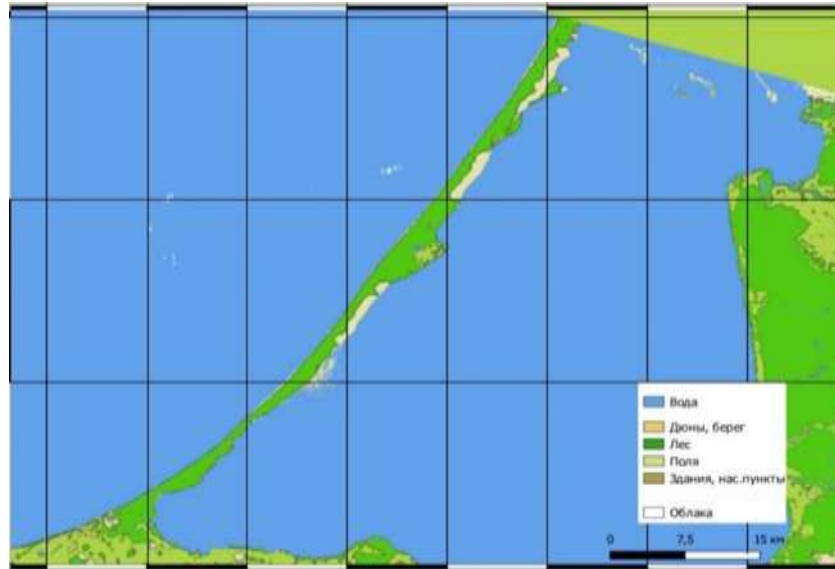


Рисунок 5 - Тематическая группировка снимка 2014 г. по категориям
(Макет с легендой)

Полученные файлы добавляются в слои рабочего набора, в результате чего появляется разноцветное изображение согласно группам (вода- синий цвет, лес, кустарники – зеленый цвет, берег, дюны – светло-желтый)



Рисунок 6 - Тематическая группировка снимка 2020 г. по категориям
(Макет с легендой)



Рисунок 7 - Тематическая группировка снимка 2024 г. по категориям (Макет с легендой)

Результаты исследования и их обсуждение.

Таблица 1

Площадь Берегов и песков по годам (2014, 2020, 2024)

Категория	Год	Площадь, га
Берег и пески	10.2014	963,4
Берег и пески	07.2020	954,7
Берег и пески	08.2024	979,6

На рисунке 5, можно заметить погрешность в объединении групп, некоторые категории объектов объединились в один, что составляет небольшие трудности в дешифрировании объектов. Это происходит из-за того, что изначально на снимке участки леса были затемнены из-за повышенной облачности. Кроме того, снимок сделан в октябре, что говорит о меньшем количестве листвы.

Таблица 2

Площадь лесов по годам (2014, 2020, 2024)

Категория	Год	Площадь, га
Лес	10.2014	4 565, 3
Лес	07.2020	4 595,2
Лес	08.2024	4 423, 5

На снимке за 2024 год лес получился более детализированным, видна небольшая территория, заросшая кустарниками, например: дюны. Менее детализированными получились берег и дюны по сравнению с 2014 и 2020 годами. На это может влиять качество снимков, так как снимки сделаны с промежутком 5 лет

Заключение. В результате проведения мониторинга состояния земель с использованием программного обеспечения QGIS 3.10 и GRASS GIS 7.4 можно сделать вывод, что изменения в национальном парке незначительные. Лес, берега и дюны остались без значительных изменений, которые приведены в таблицах 1 и 2.

Применение геоинформационных систем (ГИС) для мониторинга состояния земель в национальном парке продемонстрировало высокую эффективность современных технологий в наблюдении за особо охраняемыми природными территориями. Данные результаты подтверждают, что ГИС-технологии являются важным инструментом для реализации приоритетных задач, установленных действующим законодательством Российской Федерации для национальных парков.

Результаты мониторинга могут быть использованы для обоснования управленческих решений по рациональному природопользованию и охране природы в границах национального парка «Куршская коса».

References

1. Филипчук А.Н., Нагулевич В.В. основные направления ведения экологического мониторинга лесов НП «Куршская коса» – Текст: электронный: [сайт] - <https://www.umweltbundesamt.de> [1].
2. Снимок Куршской косы, сделанный спутником «Терра» летом 2006 года – электронный ресурс [сайт] - <https://commons.wikimedia.org>. [2].
3. Общедоступные снимки Калининградской области - электронный ресурс [сайт] - <https://glovis.usgs.gov/app> сервис USGS [3].

UDC 502.5+332.3+631.11(470.26)

Tsekoeva F.K., Semenova D.V. Monitoring of agricultural land in the Bagrationovsky and Polesky municipal districts of the Kaliningrad region

Мониторинг земель сельскохозяйственного назначения на территории Багратионовского и Полесского муниципальных округов Калининградской области

Tsekoeva Fatima Kaspolovna,

Candidate of agricultural sciences, Director of the scientific and educational center "Land management, cadastre and land monitoring", the head of educational programs of the direction "Land management and cadastres", Immanuel Kant Baltic Federal University

Semenova Darya Vladimirovna

Student of the direction "Land management and cadastres" of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "I. Kant Baltic Federal University"

Цекоева Фатима Касполовна,
к.с.-х., доцент, Директор НОЦ "Землеустройство, кадастры и мониторинг земель",
руководитель образовательных программ направления "Землеустройство и кадастры, ФГАОУ
ВО Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта
Семёнова Дарья Владимировна
Студентка направления «Землеустройство и кадастры»
ФГАОУ ВО «Балтийского федерального университета им. И. Канта»

***Abstract.** The work is aimed at analyzing the current state of land resources, identifying inefficient or problematic areas of use, as well as assessing compliance with legislative requirements in the field of land use. The goal of the study is to develop scientifically sound recommendations and measures for optimizing agricultural production activities, improving soil fertility, and ensuring the sustainable development of the region's agriculture. The results of the monitoring will contribute to the formation of an effective land policy and the adoption of informed management decisions.*

***Keywords:** onitoring, QGIS, GRASS GIS, vectorization.*

***Аннотация.** Работа направлена на анализ текущего состояния земельных ресурсов, выявление неэффективных или проблемных зон использования, а также оценку соблюдения требований законодательства в сфере землепользования. Целью исследования является разработка научно обоснованных рекомендаций и мероприятий для оптимизации агропроизводственной деятельности, повышения плодородия почв и обеспечения устойчивого развития сельского хозяйства региона. Результаты мониторинга будут способствовать формированию эффективной земельной политики и принятию обоснованных управленческих решений.*

***Ключевые слова:** мониторинг, QGIS, GRASS GIS, векторизация.*

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

Рациональное использование земель, в том числе земель сельскохозяйственного назначения, является основной целью земельной политики, осуществляемой на основе реализации таких правовых функций, как планирование и зонирование земель, их распределение-перераспределение, контроль состояния надлежащего использования.

Мониторинг земель является эффективным инструментом по рациональному использованию земель в целях контроля и наблюдения за система за их состоянием.

В настоящее время в большинстве субъектов Российской Федерации продолжается снижение плодородия почв, ухудшается состояние земель, используемых или предоставленных для ведения сельского хозяйства [1]. Почвенный покров, особенно сельскохозяйственных угодий, подвержен деградации и загрязнению, теряет устойчивость к разрушению, способность к восстановлению свойств и воспроизводству плодородия.

В связи с приватизацией земельных участков, появлением большого количества собственников земли и наличием сельскохозяйственных товаропроизводителей различных форм собственности задачи управления сельскохозяйственным производством стоят как никогда остро, а эффективное их решение невозможно без осуществления государственного мониторинга сельскохозяйственных земель.

При проведении мониторинга сельскохозяйственных земель решаются следующие задачи:

- своевременное выявление изменений состояния сельскохозяйственных земель, оценка этих изменений, прогноз и выработка рекомендаций по повышению их плодородия, предупреждению и устранению последствий негативных процессов;

- получение данных на основе систематического обследования плодородия почв и наблюдений за качественным состоянием и эффективным использованием сельскохозяйственных земель как основного ресурса сельскохозяйственной деятельности с использованием географической привязки сельскохозяйственных полигонов и контуров;

- мониторинг состояния растительности сельскохозяйственных угодий;

- ведение реестра плодородия почв сельскохозяйственных земель и учет их состояния;

- формирование государственных информационных ресурсов о сельскохозяйственных землях в целях анализа, прогнозирования и выработки государственной политики в сфере земельных отношений (в части, касающейся сельскохозяйственных земель) и эффективного использования таких земель в сельском хозяйстве, а также использования в статистической практике;

- обеспечение доступа юридических и физических лиц к информации о состоянии сельскохозяйственных земель;

- участие в международных программах (обеспечение выполнения международных обязательств).

Эффективным инструментом решения части поставленных задач является система дистанционного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения, совмещенная с наземными обследованиями сельскохозяйственных угодий, которая является составной частью системы информационного обеспечения в сфере сельского хозяйства.

Для обеспечения функционирования мониторинга внедряются новые средства и технологии, системы наблюдений, сбора и обработки информации, в том числе на основе данных дистанционного зондирования Земли как наиболее объективных и оперативных в применении, что позволяет одновременно вести наблюдение за использованием земли, а также давать прогноз развития сельскохозяйственных культур и величины потенциального урожая.

С помощью спутникового мониторинга возможно контролировать сроки и качество проведения основных агротехнических работ и тем самым оптимизировать управление сельскохозяйственным производством.

По снимкам выполняют инвентаризацию и картографирование земельных угодий на основе международной классификации использования земель, а снимки высокого разрешения применяют для создания земельного кадастра.

При систематической повторяемости съемок проводят наблюдение за динамикой развития сельскохозяйственных культур и прогнозирование урожайности. Например, зная, как меняется спектральная яркость растительности в течение вегетационного периода с учетом сельскохозяйственного календаря для разных культур, можно по тону изображения полей судить об их агротехническом состоянии и составе культур.

Применение методов дистанционного зондирования в сельском хозяйстве позволяет оперативно и точно осуществлять:

- классификацию типов сельскохозяйственных культур;
- оценку состояния посевов (оценку всхожести, смены фенофаз, развития и созревания культур);
- определение областей вымерзания озимых посевов, раннее выявление засухи;
- выделение участков эрозии, заболачивания, засоленности и опустынивания;
- определение областей гибели сельскохозяйственных культур от болезней, насекомых, дефляции, загрязнения пестицидами;
- характеристику и состояние почвы;
- прогноз урожая (качественно и количественно);
- учет и инвентаризацию посевных площадей;

- мониторинг состояния пастбищ, степени поражения болезнями и грызунами, зоны нарушения растительности в результате выпаса скота, проективное покрытие травяной растительностью;
- слежение за качеством и своевременностью проведения различных сельскохозяйственных мероприятий;
- общий мониторинг сельскохозяйственной деятельности.

Объектом исследования является два района: Багратионовский и Полесский.



Рисунок 1 – Объект в Багратионовском районе

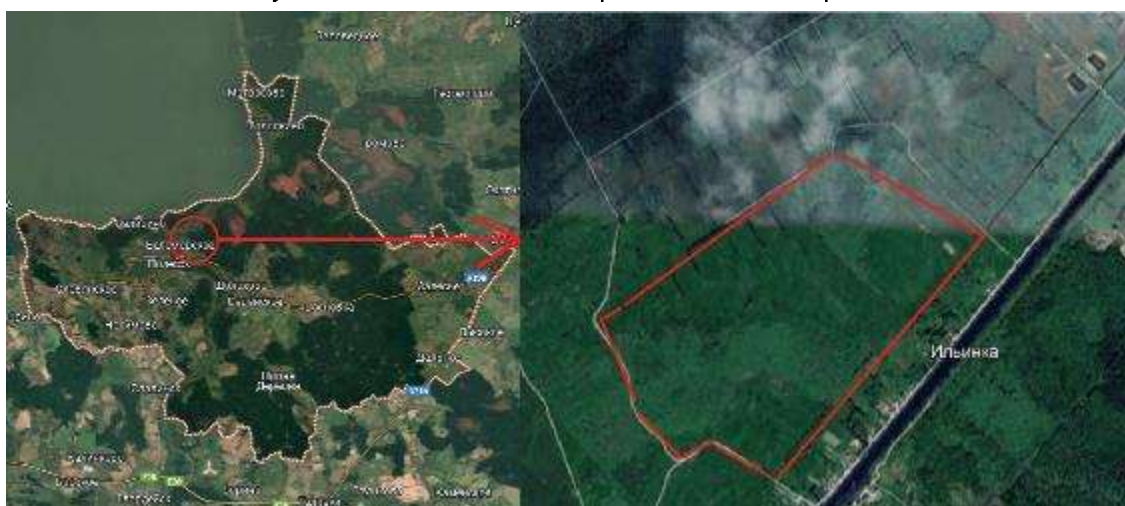


Рисунок 2 – Объекты в Полесском районе

Целью исследования является проведения мониторинг рационального использования земель сельскохозяйственного назначения на территории Багратионовского и Полесского муниципальных округов Калининградской области при помощи космических снимков, обрабатываемых в программах QGIS и GRASS GIS.

Мониторинг земель сельскохозяйственного назначения на территории Багратионовского и Полесского муниципальных округов Калининградской области проводился с использованием программного обеспечения QGIS 3.10 и GRASS GIS 7.4

на основе общедоступных снимков на сайте <https://glovis.usgs.gov/app> Sentinel - 2 было выбрано два снимка с разницей в пять лет за 2019 и 2024 года.

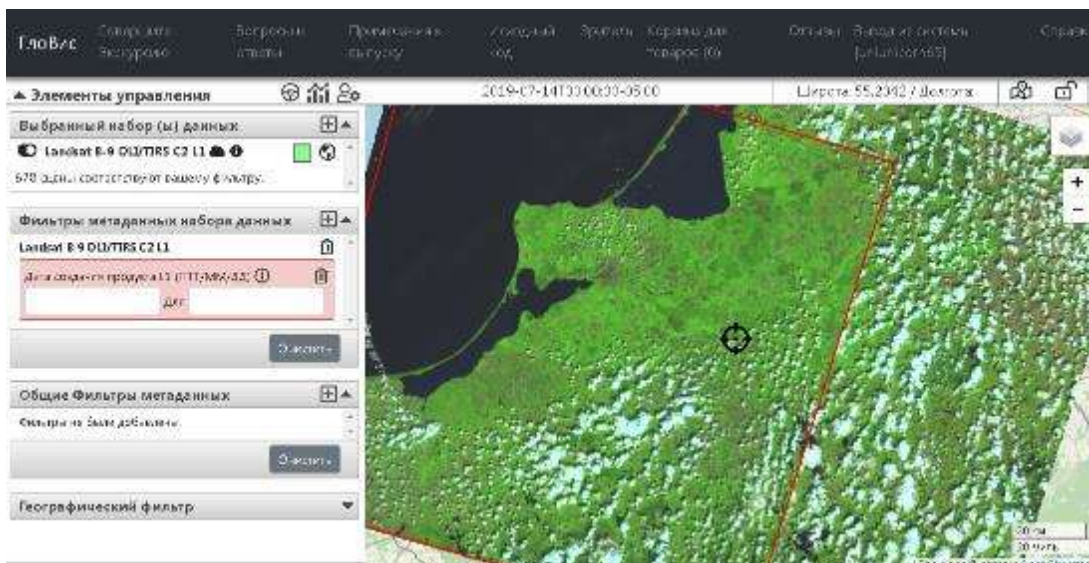


Рисунок 3 – Выбор снимков в сервисе GLOVIS

Важным фактором в данном исследовании являлся подбор качественных снимков и выбор площади исследования. При подборе снимков для исследования выбранного участка снимки подобраны качественно.

В ходе работы были проделаны следующие работы:

1. Выбор объекта исследования
2. Подбор подходящего снимка
3. Импорт данных, экспорт данных в GRASS
4. Классификация
5. Пост классификация
6. Векторизация
7. Сравнение снимков в QGIS
8. Обоснование полученных результатов

Для исследования выбраны два муниципальных округа: Багратионовского и Полесского муниципальных округов с целью проанализировать за 2019 и 2024 года изменение состояния сельскохозяйственных земель.

В начале работы исследуемые снимки, которые были скачены через сервис GLOVIS, были импортированы в программу QGIS для дальнейшей обработки, а именно цветокоррекции отображения снимков. После этого они переведены в нужный формат GRASS GIS – tiff.



Рисунок 4 – Снимок Landsat-8 за 2019 год



Рисунок 5 – Снимок Landsat-8 2024 год

В начале процесса проведена классификация снимков без обучения в программе GRASS GIS. Для этого необходимо создать группу и подгруппу снимков, по которым будет проводиться классификация. Запущен модуль [i.group], Создана группу «group», добавляем: каналы: B1,B2,B3,B4,B5,B6,B7 включена функция «Редактировать по группам», в пункте «Select existing subgroup...» вписываем «subgroup» и отмечены все добавленные каналы

Классификация без обучения в GRASS основана на автоматической кластеризации объектов со сходными спектральными характеристиками, которые определяются в один класс. Число классов задаётся пользователем.

В случае классификации без обучения классификации, алгоритм принимает на вход необходимое количество классов и разделяет все изображение на группы с однородной текстурой в рамках заданного порога.

В конечном итоге объекты, которые имеют сходные спектральные характеристики определены в один класс, а число таких классов задается пользователем, многие параметры подбираются только через многочисленные эксперименты.

При выполнении работы разбиты снимки на 15 классов, в результате получается классифицированное изображение, степень интерпретируемости которого сильно зависит от характера местности и подобранных параметров.

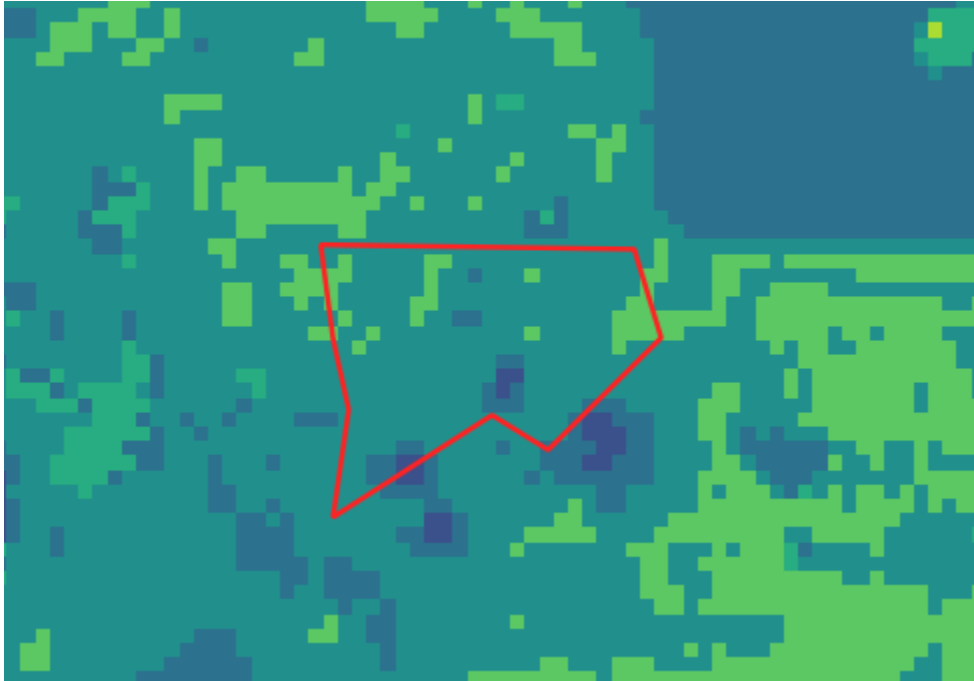


Рисунок 6 - Классификация без обучения (снимок за 2019 год)
Багратионовский МО



Рисунок 7 - Классификация без обучения (снимок за 2019 год) Полесский МО

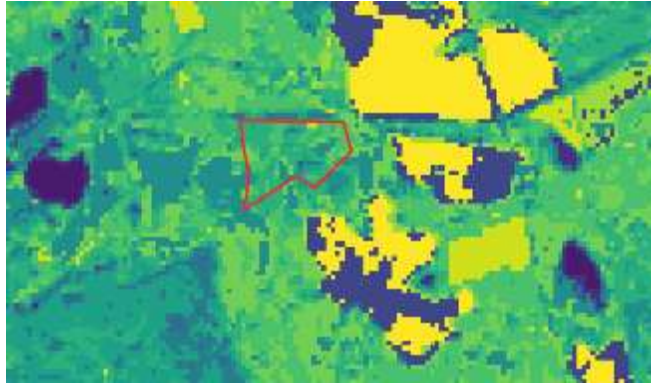


Рисунок 8 - Классификация без обучения (снимок за 2024 год)
Багратионовский МО

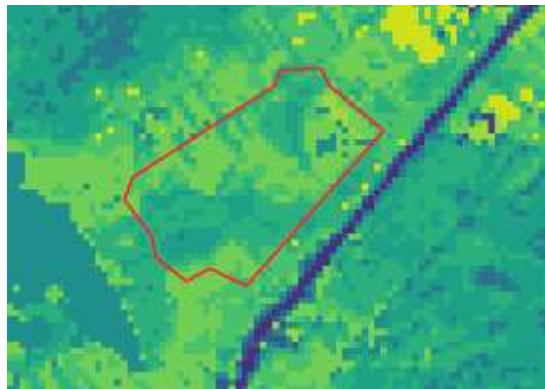


Рисунок 9 - Классификация без обучения (снимок за 2024 год) Полесский МО

Следующим этапом выполнено объединение классов в группы с идентичными спектральными характеристиками с помощью модуля Классификация максимального подобия. После этого необходимо перейти к важному этапу, а именно выполнение постклассификации. Эта процедура обработки является необязательным этапом классификации, но лучше провести ее для очистки изображения, чтобы сгладить углы объектов и убрать шумы.

Завершающим этапом в работе с программой GRASS GIS является преобразование растра в вектор. Файлы классификации, воды и облаков преобразованы в векторный формат с помощью модуля [r.to.vect].



Рисунок 10 - Результат векторизации снимка за 2019 г Багратионовский МО



Рисунок 11 - Результат векторизации снимка за 2019 г. Полесский МО

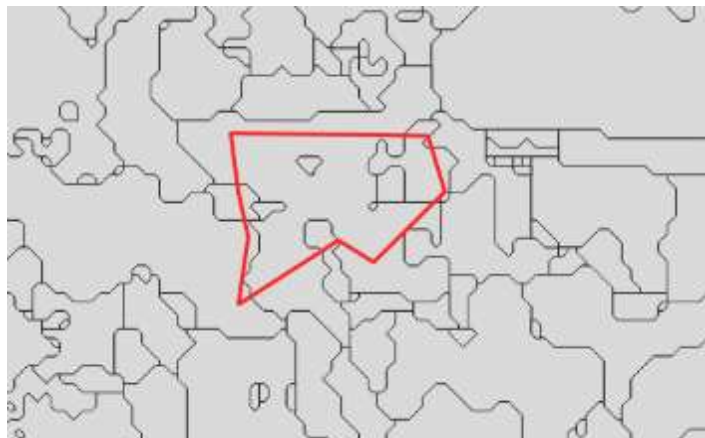


Рисунок 12 - Результат векторизации снимка за 2024 г Багратионовский МО



Рисунок 13 - Результат векторизации снимка за 2024 г. Полесский МО

Дальше происходит оформление карты в QGIS, т.к. GRASS не является идеальной средой для оформления макетов карт. Существует модуль GRASS 7, который для дальнейшей работы необходимо установить (Рисунок 43).

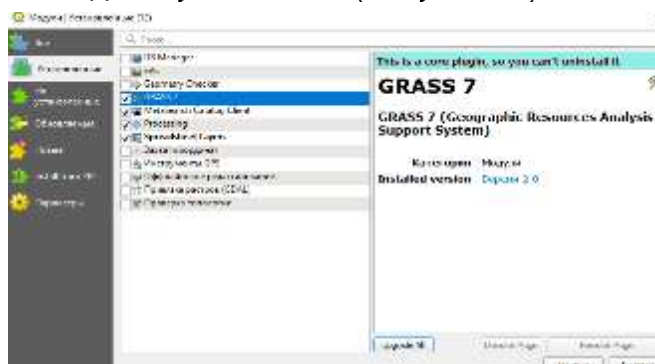
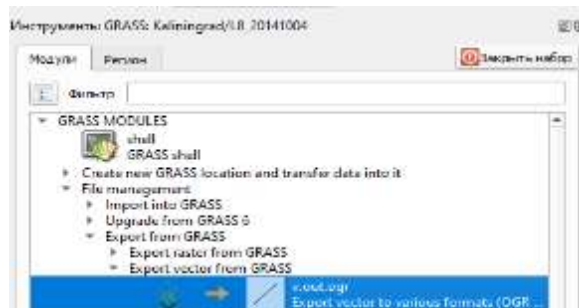


Рисунок 14 - Модуль GRASS 7

Выбирается нужный набор, который был создан в программе GrassGis. Далее в инструменте GRASS выбран модуль V.OUT.ogr (Рисунок 15).



С помощью модуля (V.OUT.ogr) выставляются нужные параметры:

1. «Name...» - class15,
2. «Data» - ESRI_Shapefile,
3. Галочка – area.

Выбрать папку для сохранения и вписать название class15.shp сохранить и выполнить (Рисунок 16). То же самое проделано с cloud и water.

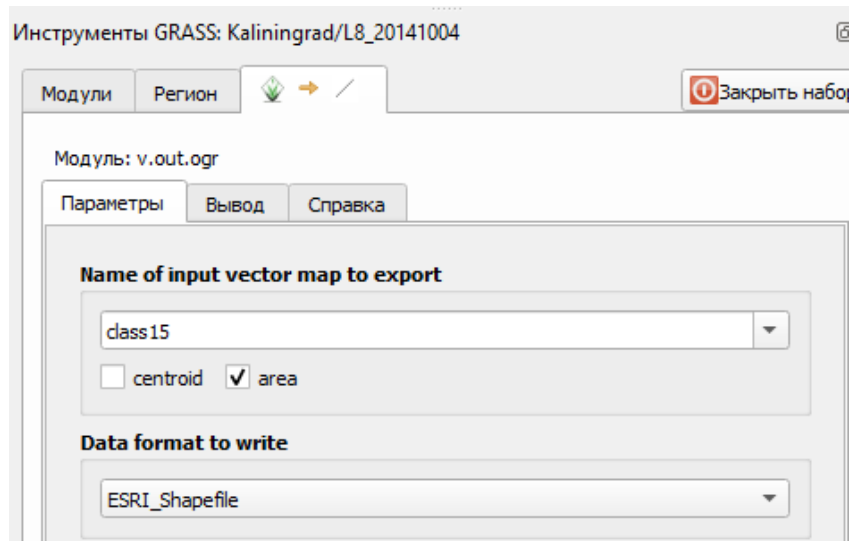


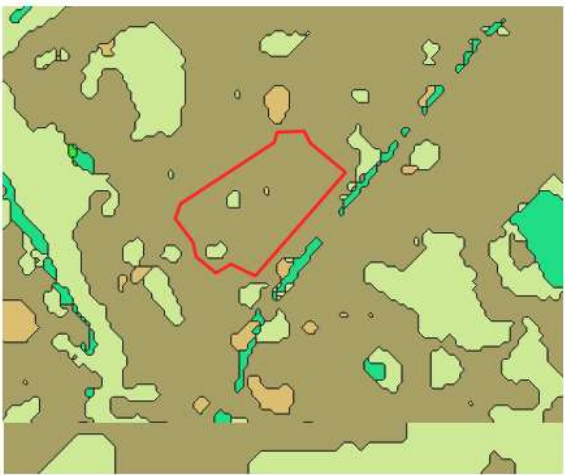



Рисунок 16. Модуль V.OUT.ogr

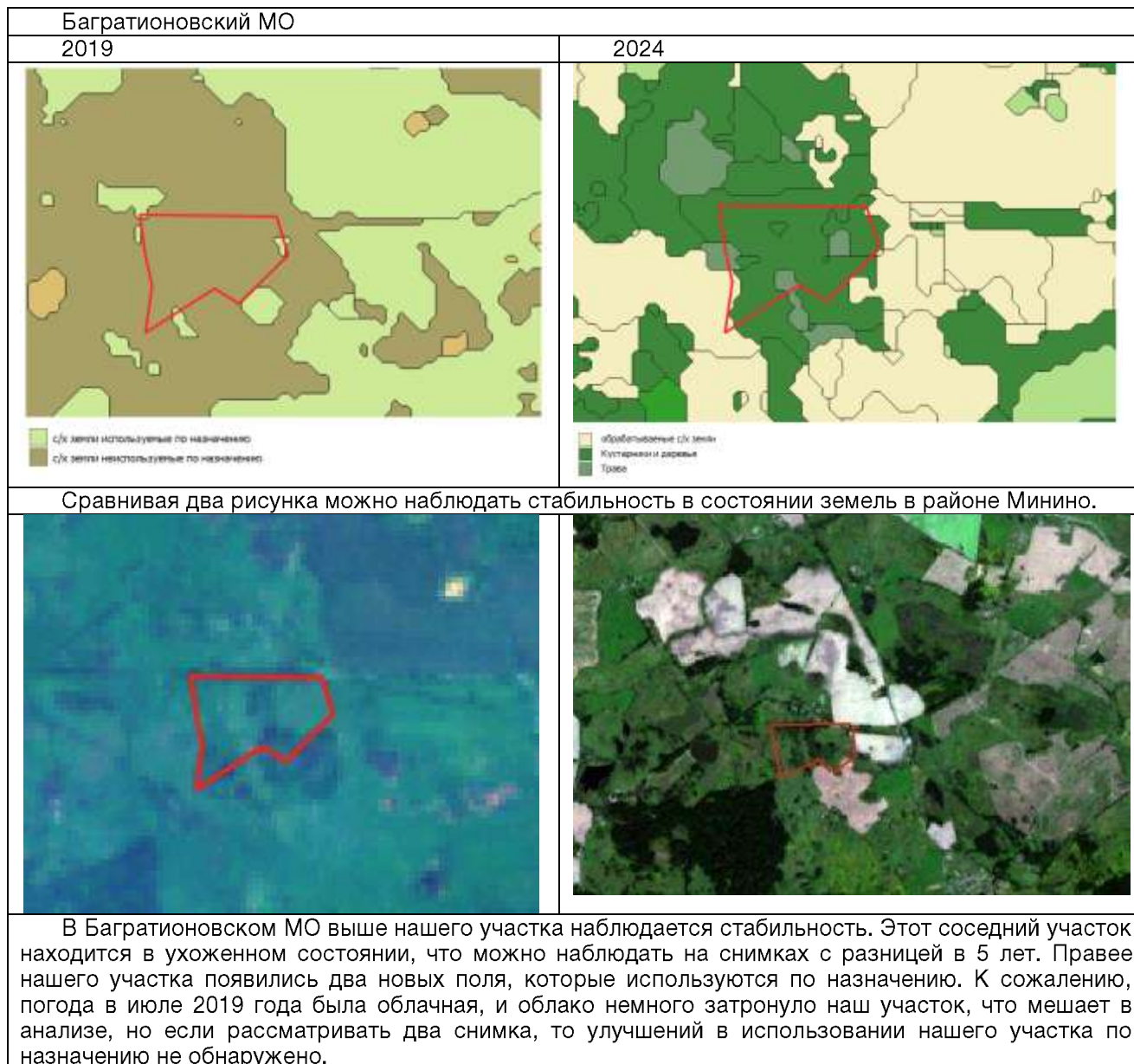
Далее открыты и добавлены все нужные слои с помощью инструмента «Менеджер источников данных». В результате переноса shp-файла в QGIS, в окне программы появляется разноцветное изображение



Рисунок 17 - Результат добавления слоев

Данное изображение необходимо «раскрасить» согласно группам (вода- синий цвет, лес, кустарники – зеленый цвет и тд.)

Полесский МО	
2019	2024
 <p>с/х земли используемые по назначению с/х земли неиспользуемые по назначению</p>	 <p>Трава и кустарники на полях обрабатываемые с/х земли Кустарники и деревья</p>
<p>В результате сравнения за 5 лет, исключив, некорректное отображение, можно сделать вывод, что развитие земельных участков имеет небольшую положительную динамику. За 5 лет состояние соседних сельскохозяйственных земель улучшилось. К сожалению, наш исследуемый участок не имеет положительной динамики в улучшении состоянии земли.</p>	
	
<p>На снимке за 2024 год объекты получились более детализированными, объекты видны четче, что помогает нам в анализе территории. Можно сделать вывод, что есть небольшие улучшения состояния земель, которые находятся вокруг нашего участка, но сам наш участок остался без изменений.</p>	



В результате сравнения снимков за 2019 и 2024 года, исключив, некорректное отображение, можно сделать вывод, что развитие земельных участков имеет стабильность, но в Багратионовском районе видны улучшения. Правее нашего исследуемого участка появились два новых поля, которые используются по назначению. Продолжают существовать и сохранять свое состояние земельные участки, которые являются соседними участками нашего исследуемого участка в Багратионовском МО.

Таким образом, дешифрирования разновременных снимков показало, что в Багратионовском МО Калининградской области видны улучшения. Но в Полесском

районе земельные участки в своем стабильном состоянии, происходит сокращение сельскохозяйственных угодий и пашни, что является отрицательным развитием территории и приводит к негативным последствиям.

References

1. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 29.12.2022) // Система «КонсультантПлюс» [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/
2. Налоговый кодекс Российской Федерации часть вторая от 05.08.2000 № 117-ФЗ (ред. от 11.10.2022) // Система «КонсультантПлюс» [Электрон. ресурс]. URL:http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_28165
3. Федеральный закон «О государственной регистрации недвижимости» от 13.07.2015 № 218-ФЗ (ред. от 18.03.2023) // Система «КонсультантПлюс»[Электронныйресурс].https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW
4. Федеральный закон от 18.06.2001 N 78-ФЗ (ред. от 30.12.2021) «О землеустройстве» // Система «КонсультантПлюс» [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_32132/

UDC 502.5(470.26)

Tsekoeva F.K., Shipov T.K. Protection and rational use of land resources in a municipality of the Kaliningrad region (a case study of the Chernyakhovsk urban district)

Охрана и рациональное использование земельных ресурсов в муниципальном образовании Калининградской области (на примере Черняховского городского округа)

Tsekoeva Fatima Kaspolovna,

Candidate of agricultural sciences, Associate Professor, Director of the Scientific and Educational Center «Land Management, Cadastre and Land Monitoring», Head of educational programs of the direction «Land Management and Cadastres», Immanuel Kant Baltic Federal University

Shipov Timur Konstantinovich,

Master's student of the 2nd year of the program 21.04.02 «Land Management and Cadastres», Immanuel Kant Baltic Federal University

Цекоева Фатима Касполовна,
к.с.-х.н., доцент, Директор НОЦ «Землеустройство, кадастры и мониторинг земель»,
руководитель образовательных программ направления

«Землеустройство и кадастры»,
ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»

Шипов Тимур Константинович,
магистрант 2 курса направления подготовки

21.04.02 «Землеустройство и кадастры»,
ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»

Abstract. *The article addresses the protection and rational use of land resources in a municipality of the Kaliningrad region, using the Chernyakhovsk urban district as a case study. The structure of the municipal land fund is analyzed, along with the condition of agricultural lands by soil, reclamation, and economic indicators. Seven groups of land use problems are identified. An integral indicator of agricultural land use efficiency is calculated. Directions for improving the land resources management of the municipality are proposed, based on comprehensive cadastral works and the application of the National Spatial Data System (NSDS) services.*

Keywords: *land protection, rational land use, municipality, Chernyakhovsk urban district, Kaliningrad region, agricultural lands, reclamation, comprehensive cadastral works, National Spatial Data System.*

Аннотация. *В статье рассмотрены вопросы охраны и рационального использования земельных ресурсов муниципального образования Калининградской области на примере Черняховского городского округа. Дан анализ структуры земельного фонда муниципалитета, состояния земель сельскохозяйственного назначения по почвенным, мелиоративным и хозяйственным характеристикам. Выявлены семь групп проблем землепользования. Рассчитан интегральный показатель эффективности использования земель сельскохозяйственного назначения. Предложены направления совершенствования управления земельными ресурсами муниципалитета на основе проведения комплексных кадастровых работ и применения сервисов Национальной системы пространственных данных.*

Ключевые слова: *охрана земель, рациональное использование земель, муниципальное образование, Черняховский городской округ, Калининградская область, земли сельскохозяйственного назначения, мелиорация, комплексные кадастровые работы, Национальная система пространственных данных.*

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

Введение

Земля является основой жизни и деятельности народов России. Этот тезис закреплён в статье 9 Конституции РФ и проходит красной нитью через всё земельное законодательство страны. Из конституционной нормы вытекают обязанности всех уровней публичной власти — обеспечивать охрану земель и их рациональное использование. На муниципальном уровне ответственность за это лежит на органах местного самоуправления.

Калининградская область — единственный эксклавный субъект Российской Федерации. Регион имеет ряд особенностей землепользования: высокую долю мелиорированных земель, унаследованную от довоенного периода; кислые почвы балтийского типа; развитое сельское хозяйство. Эти обстоятельства повышают требования к качеству управления земельными ресурсами.

Черняховский городской округ — типичный аграрно-индустриальный муниципалитет области. Доля земель сельскохозяйственного назначения здесь — 65,5 % от общей территории. Поэтому именно этот муниципалитет был выбран как объект исследования: анализ его земельного фонда показателен для большинства муниципальных образований региона.

С 23 декабря 2024 года в стране введена в эксплуатацию Национальная система пространственных данных (НСПД, nspd.gov.ru). Платформа создана в рамках государственной программы, утверждённой постановлением Правительства РФ от 01.12.2021 № 2148 [5]. Для муниципалитетов это новый инструмент управления, потенциал которого пока используется не полностью.

Цель работы — обобщить состояние земельных ресурсов муниципального образования Калининградской области и сформулировать направления совершенствования управления их охраной и рациональным использованием.

Материалы и методы исследования

Информационную основу исследования составили данные Управления Росреестра по Калининградской области, Калининградстата, Министерства сельского хозяйства Калининградской области, Управления Россельхознадзора по Калининградской области, государственного (национального) доклада о состоянии и использовании земель в Российской Федерации [3], доклада о состоянии и использовании земель в Калининградской области за 2023 год, сведения публичной кадастровой карты НСПД (nspd.gov.ru) [4]. Используются также муниципальные нормативные правовые акты Черняховского ГО.

В исследовании применены системный анализ, сравнительный и статистический методы, расчётно-аналитический метод, картографический метод, метод работы с

публичной кадастровой картой на платформе НСПД, анализ нормативно-правовых актов.

Структура земельного фонда Черняховского городского округа

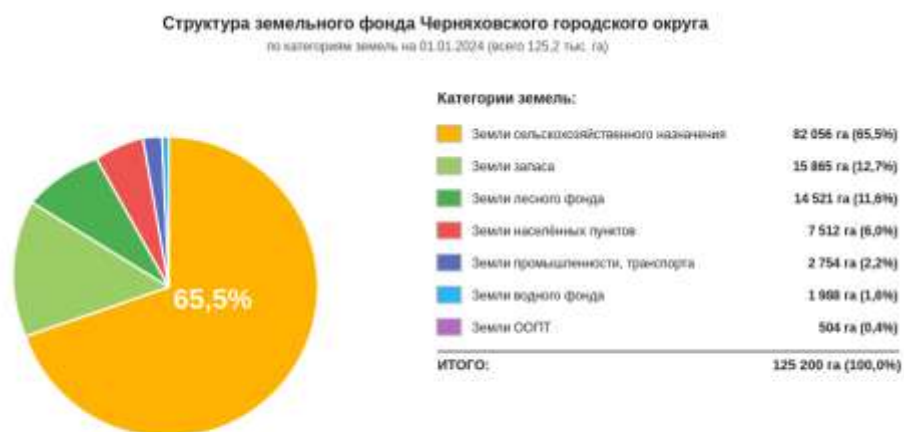
Общая площадь Черняховского городского округа составляет 125,2 тыс. га. Это 8,3 % территории Калининградской области. Численность населения муниципалитета на 01.01.2024 — 47,8 тыс. человек, из которых 35,2 тыс. (73,6 %) проживают в городе, 12,6 тыс. (26,4 %) — в сельской местности. Распределение площади земельного фонда по категориям представлено в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1

Распределение земельного фонда Черняховского ГО по категориям земель на 01.01.2024

Категория земель	Площадь, га	Доля, %
Земли сельскохозяйственного назначения	82 056	65,5
Земли населённых пунктов	7 512	6,0
Земли промышленности, энергетики, транспорта, связи	2 754	2,2
Земли особо охраняемых территорий и объектов	504	0,4
Земли лесного фонда	14 521	11,6
Земли водного фонда	1 988	1,6
Земли запаса	15 865	12,7
ИТОГО	125 200	100,0

Источник: составлено авторами по данным Управления Росреестра по Калининградской области.



Источник: составлено авторами по данным Управления Росреестра по Калининградской области.

Рисунок 1 — Структура земельного фонда Черняховского ГО по категориям земель

В структуре земельного фонда муниципального образования абсолютно преобладают земли сельскохозяйственного назначения — 82 056 га, или 65,5 % территории. Это значительно превышает среднероссийский показатель (около 22,4 %) и характеризует Черняховский городской округ как аграрно ориентированное муниципальное образование. Второе место занимают земли запаса (15 865 га, 12,7 %), третье — земли лесного фонда (14 521 га, 11,6 %).

Авторы обращают внимание на тревожную тенденцию: за период 2020–2024 годов площадь земель сельскохозяйственного назначения сократилась на 1 478 га (–1,77 %), а площадь земель запаса выросла на 908 га. Часть сельскохозяйственных угодий фактически выведена из оборота, что противоречит задачам обеспечения продовольственной безопасности.

На 01.01.2024 в Едином государственном реестре недвижимости (ЕГРН) зарегистрировано 38 247 земельных участков в границах муниципального образования. Из них 31 482 (82,3 %) имеют установленные в соответствии с земельным законодательством границы. Оставшиеся 6 765 участков (17,7 %) точных границ не имеют, что создаёт правовые риски и порождает земельные споры.

Структура сельскохозяйственных угодий выглядит следующим образом: пашня — 48 184 га (61,1 %), сенокосы — 13 480 га (17,1 %), пастбища — 12 372 га (15,7 %), залежи — 2 540 га (3,2 %), многолетние насаждения — 315 га (0,4 %), прочие угодья — 1 965 га (2,5 %). Доля залежей превышает оптимальный уровень и указывает на проблему неполного вовлечения земель в сельскохозяйственный оборот.

Состояние земель сельскохозяйственного назначения

Качественные характеристики почв сельскохозяйственных угодий Черняховского ГО оцениваются по данным агрохимического обследования. Преобладают дерново-подзолистые почвы (58 % сельхозугодий), за ними следуют дерново-глеевые и дерново-подзолисто-глеевые (24 %), болотно-подзолистые (12 %), аллювиальные луговые (6 %). Качественные показатели плодородия пашни приведены в таблице 2.

Таблица 2

Качественные показатели почв пахотных угодий Черняховского ГО

Показатель плодородия	Факт	Норматив	Доля площадей с неоптим. знач., %
Содержание гумуса в пахотном слое, %	1,8–2,6	3,0–3,5	74,0
Реакция почвенного раствора (рН)	4,6–5,4	5,8–6,5	62,0
Содержание подвижного фосфора (P ₂ O ₅), мг/кг	85	> 150	58,0
Содержание подвижного калия (K ₂ O), мг/кг	110	> 170	47,0
Содержание азота (общий), %	0,12	> 0,18	63,0

Источник: рассчитано авторами по данным Управления Россельхознадзора по Калининградской области.

Содержание гумуса в пахотном слое (1,8–2,6 %) ниже нормативного уровня для дерново-подзолистых почв (3,0–3,5 %). Реакция почвенного раствора преимущественно кислая (рН 4,6–5,4), что свидетельствует о потребности в систематическом известковании. В известковании нуждается 62 % площади пашни — около 29,9 тыс. га. По данным регионального Минсельхоза, в 2020–2023 годах работы по известкованию проводились в Черняховском ГО на площади 1,5–2,0 тыс. га ежегодно. При нормальном цикле повторного известкования (один раз в 5–7 лет) ежегодный объём работ должен составлять 5,0–6,0 тыс. га. Налицо трёхкратное отставание от научно обоснованной потребности.

Мелиоративное состояние земель округа — особый предмет внимания. Общая протяжённость мелиоративной сети составляет 4 200 км. Площадь мелиорированных сельскохозяйственных земель — 42,0 тыс. га, или 53,3 % сельскохозяйственных угодий. Основная часть мелиоративной сети сформирована в довоенный период (до 1945 года) и реконструирована в советское время. С 1991 года объёмы работ по реконструкции сократились более чем в 10 раз. На 01.01.2024 в реконструкции нуждаются 27,3 тыс. га (65 % мелиорированной площади). Фактический темп работ — 0,5–0,7 тыс. га в год — в 5–6 раз ниже потребности (3,0–4,0 тыс. га в год).

Степень вовлечения земель сельскохозяйственного назначения в фактический сельскохозяйственный оборот характеризуется относительно высоким коэффициентом использования пашни — 0,943. Из 48,2 тыс. га пашни в 2023 году засеяно 45,4 тыс. га. Неиспользуемой остаётся 2,8 тыс. га пашни. С учётом залежей (2,5 тыс. га) общая площадь неиспользуемых сельскохозяйственных угодий составляет 5 340 га (6,8 %). По

данным Министерства сельского хозяйства Калининградской области, средняя стоимость культуртехнических работ по возвращению таких земель в оборот составляет около 28,5 тыс. руб./га.

Урожайность основных сельскохозяйственных культур в Черняховском ГО соответствует уровню среднеобластных показателей: зерновых и зернобобовых — 42,8 ц/га, рапса — 28,4 ц/га, картофеля — 218 ц/га. поголовье крупного рогатого скота — 24,8 тыс. голов, в том числе коров — 11,2 тыс. Производство молока в 2023 году — 68,5 тыс. т, мяса в живом весе — 12,7 тыс. т, зерна — 78,4 тыс. т. Сельскохозяйственное производство ведётся на удовлетворительном технологическом уровне.

Проблемы охраны и рационального использования земельных ресурсов

На основе анализа состояния земельного фонда муниципалитета авторами выделены семь групп проблем охраны и рационального использования земель. Их количественная оценка приведена в таблице 3 и проиллюстрирована на рисунке 2.

Таблица 3

Проблемы охраны и рационального использования земельных ресурсов
Черняховского ГО

Группа проблем	Количественная оценка
Качество и плодородие почв	62,0 % пашни требует известкования (≈ 29,9 тыс. га)
Мелиоративное состояние	65,0 % мелиор. площади требует реконструкции (≈ 27,3 тыс. га)
Неиспользование с/х земель	≈ 5 340 га (6,8 % с/х угодий)
Кадастровая обеспеченность	17,7 % участков без точных границ (6 765 участков)
Деградация земель	≈ 14,8 % с/х угодий (≈ 11,7 тыс. га)
Соответствие ВРИ фактическому использованию	≈ 8,2 % земельных участков (≈ 3 100 участков)
Информационное обеспечение управления	Качественная оценка

Источник: систематизировано авторами.

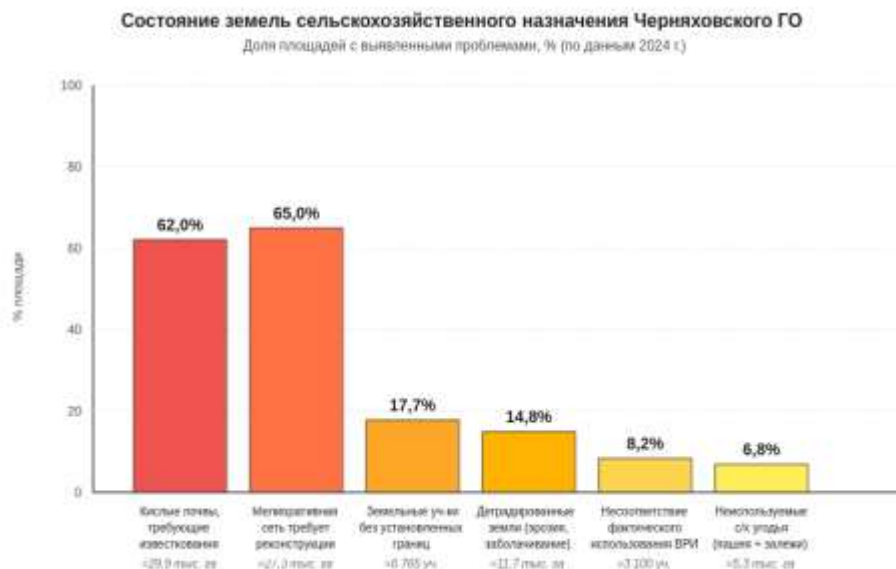


Рисунок 2 — Количественная оценка основных проблем землепользования в Черняховском ГО

Самая массовая по площади охвата проблема — неудовлетворительное мелиоративное состояние земель (65 % мелиорированных площадей, около 27,3 тыс. га). Вторая по масштабу — необходимость известкования почв (62 % пашни). Третья — низкая кадастровая обеспеченность (17,7 % земельных участков без установленных границ). Каждая из этих проблем требует управленческого решения на уровне муниципального образования с привлечением федеральных и региональных ресурсов.

Проблема качества почв имеет природно-историческое происхождение: промывной режим увлажнения и состав почвообразующих пород «работают» против сохранения гумуса и нейтральной кислотности. В постсоветский период ситуация усугубилась резким сокращением объёмов агрохимических мероприятий. Внесение органических удобрений в среднем составляет 4,2 т/га в год при научно обоснованной норме 7–8 т/га.

Проблема мелиорации — наследие изношенной инфраструктуры. Мелиоративная сеть эксплуатируется свыше 40 лет, в отдельных частях — до 80. Локальное переувлажнение и заболачивание сельскохозяйственных земель ведут к снижению продуктивности и недополучению до 12–18 % потенциальной валовой продукции. Финансирование работ возможно в рамках Государственной программы эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса РФ (постановление Правительства РФ от 14.05.2021 № 731 [6]).

Проблема недостаточной кадастровой обеспеченности территории создаёт целый веер сопутствующих рисков. Земельные споры. Сложности с муниципальным земельным контролем. Препятствия для гражданского оборота земельных участков. Особенно остро проблема стоит в категории земель сельскохозяйственного назначения — 2 850 участков общей площадью около 4 200 га не имеют установленных границ. Решение — комплексные кадастровые работы согласно главе 4.1 Федерального закона от 24.07.2007 № 221-ФЗ [1].

Оценка эффективности использования земель сельскохозяйственного назначения

Для интегральной оценки эффективности использования земель сельскохозяйственного назначения авторами применена методика, основанная на свёртке частных показателей с весовыми коэффициентами:

$$Иэ = \sum (\alpha_i \times k_i),$$

где α_i — весовой коэффициент i -го частного показателя ($\sum \alpha_i = 1$); k_i — нормированное значение i -го показателя ($0 \leq k_i \leq 1$). Для показателей-стимуляторов нормирование выполнено по формуле $k_i = \text{факт} / \text{эталон}$, для дестимуляторов — $k_i = \text{эталон} / \text{факт}$. Результаты расчёта приведены в таблице 4.

Таблица 4

Расчёт интегрального показателя эффективности использования земель сельскохозяйственного назначения Черняховского ГО

Частный показатель	Факт	Эталон	α_i	$\alpha_i \times k_i$
Коэффициент использования пашни	0,943	1,000	0,25	0,236
Стоимость валовой продукции на 1 га, тыс. руб.	78,4	90,0	0,20	0,174
Урожайность зерновых, ц/га	42,8	45,0	0,15	0,143
Доля площадей с неоптимальной кислотностью, %	62,0	$\leq 20,0$	0,15	0,048
Доля деградированных земель, %	14,8	$\leq 5,0$	0,10	0,034
Доля кадастрово учтённых участков, %	82,3	100,0	0,10	0,082
Поступления земельного налога на 1 га, руб.	184	220	0,05	0,042
ИТОГО (Иэ)	—	—	1,00	0,759

Источник: рассчитано авторами по данным Калининградстата, Управления Росреестра по Калининградской области и Министерства сельского хозяйства Калининградской области.

Полученное значение интегрального показателя — 0,759 — соответствует уровню высокой эффективности использования земель сельскохозяйственного назначения (диапазон 0,60–0,80). Однако значение лежит в нижней части интервала, что указывает на наличие существенного резерва для повышения. Декомпозиция показателя по факторам позволила выделить три основных источника снижения значения интегрального показателя: неоптимальная кислотность почв (вклад в снижение — около 32 %), наличие деградированных земель (около 22 %) и недостаточная кадастровая обеспеченность (около 12 %).

Указанные три фактора определяют приоритетные направления управленческих решений в сфере охраны и рационального использования земельных ресурсов муниципалитета: химическая мелиорация (известкование), мелиоративные и противоэрозионные мероприятия, проведение комплексных кадастровых работ.

Управление земельными ресурсами муниципального образования

Управление земельными ресурсами Черняховского городского округа осуществляется в многоуровневой системе, объединяющей органы власти трёх уровней — федерального, регионального и муниципального. Структура системы представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 — Система управления земельными ресурсами Черняховского городского округа

Федеральный уровень управления представлен Росреестром (ведение ЕГРН, государственный земельный надзор, координация работ по НСПД), Россельхознадзором (государственный земельный надзор в отношении сельхозземель, мониторинг плодородия), Минсельхозом России (государственные программы развития АПК), публично-правовой компанией «Роскадастр» (ведение информационных систем НСПД, государственная кадастровая оценка). Региональный уровень — Министерство градостроительной политики Калининградской области, Министерство сельского хозяйства Калининградской области, Управление Росреестра по Калининградской области. Муниципальный уровень — пять основных подразделений администрации Черняховского ГО: Управление муниципальной собственности, Отдел архитектуры и градостроительства, Отдел муниципального контроля, Управление сельского хозяйства, Финансовое управление.

Анализ результативности муниципального земельного контроля за 2021–2023 годы показывает положительную динамику. Количество проверок выросло со 128 до 163 (+27 %), количество выявленных нарушений — с 47 до 78 (+66 %), сумма наложенных штрафов — с 420 до 740 тыс. руб. (+76 %). При этом доля устранённых нарушений остаётся в коридоре 70–74 %, что указывает на резерв повышения эффективности правового воздействия.

Авторы выделяют следующие слабые стороны действующей системы управления земельными ресурсами муниципалитета: ограниченное использование сервисов НСПД в практике муниципального управления; недостаточная актуализация документов градостроительного зонирования (8,2 % земельных участков с несоответствием ВРИ); редкое применение механизма принудительного изъятия неиспользуемых сельскохозяйственных земель (за 2020–2023 годы возбуждено около 12 судебных дел при наличии 5,3 тыс. га неиспользуемых угодий); низкая кадастровая обеспеченность территории.

Комплексные кадастровые работы и применение НСПД как инструменты совершенствования управления

Комплексные кадастровые работы (ККР), правовая основа которых заложена главой 4.1 Федерального закона от 24.07.2007 № 221-ФЗ «О кадастровой деятельности» [1], представляют собой эффективный инструмент решения проблемы кадастровой обеспеченности территории. ККР заказываются органом местного самоуправления и проводятся одновременно по всем объектам недвижимости в границах одного или нескольких кадастровых кварталов. Это обеспечивает снижение удельной стоимости работ и существенное повышение качества сведений ЕГРН.

Применительно к Черняховскому ГО общая ориентировочная стоимость проведения ККР по всем 6 765 участкам без установленных границ составляет около 18,7 млн руб. Расчёт выполнен на основе предельных стоимостных параметров, утверждённых письмом Росреестра от 03.04.2024 № 13-00305/24. С учётом возможности привлечения федеральных субсидий и средств регионального бюджета на условиях софинансирования по схеме 70/20/10 (федеральный, региональный, местный бюджеты), нагрузка на местный бюджет составит около 1,9 млн руб.

Распределение объёмов ККР по годам (2026–2028) предложено следующим образом: 2026 год — кадастровые кварталы города Черняховска (2 200 участков, 6,1 млн руб.); 2027 год — сельские населённые пункты муниципалитета (2 400 участков, 7,1 млн руб.); 2028 год — земли сельскохозяйственного назначения и земли запаса (2 165 участков, 5,5 млн руб.). Ожидаемый результат — повышение кадастровой обеспеченности муниципального образования с текущих 82,3 % до 100 %.

Национальная система пространственных данных предоставляет органам местного самоуправления качественно новый инструмент управления земельно-имущественным комплексом. Публичная кадастровая карта НСПД на портале nspd.gov.ru обеспечивает бесплатный доступ ко всем сведениям ЕГРН [4], а интегрированные с ней сервисы — «Земля для стройки», «Земля для туризма», «Сельскохозяйственные земли» — расширяют возможности управления отдельными категориями земель.

Авторы предлагают комплекс мероприятий по системному внедрению сервисов НСПД в практику управления земельными ресурсами Черняховского ГО на период 2026–2028 годов. В него входят: обучение сотрудников администрации работе с НСПД; формирование цифрового паспорта муниципального образования на платформе НСПД; применение НСПД при актуализации правил землепользования и застройки; интеграция системы муниципального земельного контроля с НСПД; применение сервиса «Сельскохозяйственные земли» для выявления неиспользуемых угодий; размещение перечня свободных муниципальных земель в сервисе «Земля для стройки»; мониторинг применения НСПД и оценка эффективности.

Ожидаемые управленческие эффекты от реализации предложенных мероприятий: сокращение сроков предоставления муниципальных услуг в сфере земельных отношений в 2–3 раза; повышение оперативности муниципального земельного контроля (сокращение трудозатрат в 2–3 раза); расширение налогооблагаемой базы по земельному налогу на 12–15 % (что в денежном выражении составит дополнительно 22–28 млн руб. в год для местного бюджета); рост доли земельных участков с установленными границами с 82,3 % до 100 % (в связке с ККР);

снижение площади неиспользуемых сельскохозяйственных угодий с 5,3 тыс. га до 2,0 тыс. га к 2028 году.

Заключение

Проведённое исследование позволило обобщить состояние земельных ресурсов Черняховского городского округа Калининградской области и выявить ключевые проблемы их охраны и рационального использования. Структура земельного фонда муниципалитета характеризуется абсолютным преобладанием земель сельскохозяйственного назначения (65,5 %). Состояние сельхозземель далеко от оптимального: 62 % пашни требует известкования, 65 % мелиоративной сети нуждается в реконструкции, 17,7 % земельных участков не имеют установленных границ, около 5,3 тыс. га сельскохозяйственных угодий не вовлечены в оборот.

Рассчитанный авторами интегральный показатель эффективности использования земель сельскохозяйственного назначения — 0,759 — соответствует высокому уровню, но лежит в нижней части соответствующего интервала. Основные факторы снижения значения интегрального показателя — кислотность почв, деградация земель и недостаточная кадастровая обеспеченность.

Совершенствование управления охраной и рациональным использованием земельных ресурсов муниципального образования возможно через два ключевых инструмента: комплексные кадастровые работы (с ориентировочной стоимостью 18,7 млн руб. для всех 6 765 участков без установленных границ Черняховского ГО) и применение Национальной системы пространственных данных (комплекс из 9 мероприятий на 2026–2028 годы). Реализация этих мер обеспечит повышение качества управления и приведёт к измеримому росту эффективности использования земельных ресурсов.

Полученные результаты могут быть использованы администрацией Черняховского городского округа и иных муниципальных образований Калининградской области при подготовке муниципальных программ в сфере земельных отношений, при проведении комплексных кадастровых работ, при внедрении сервисов НСПД в практику муниципального управления, при подготовке документов территориального планирования и градостроительного зонирования.

References

1. О кадастровой деятельности : Федеральный закон от 24.07.2007 № 221-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. — 2007. — № 31. — Ст. 4017. — Текст : непосредственный.

2. Об обороте земель сельскохозяйственного назначения : Федеральный закон от 24.07.2002 № 101-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. — 2002. — № 30. — Ст. 3018. — Текст : непосредственный.

3. Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2022 году / Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии. — Москва : Росреестр, 2023. — 207 с. — Текст : непосредственный.

4. Публичная кадастровая карта Российской Федерации : официальный сайт Национальной системы пространственных данных. — URL: <https://nspd.gov.ru> (дата обращения: 15.05.2026). — Текст : электронный.

5. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Национальная система пространственных данных» : постановление Правительства Российской Федерации от 01.12.2021 № 2148 // Собрание законодательства Российской Федерации. — 2021. — № 50, ч. III. — Ст. 8527. — Текст : непосредственный.

6. Об утверждении Государственной программы эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации : постановление Правительства Российской Федерации от 14.05.2021 № 731. — URL: <http://pravo.gov.ru> (дата обращения: 15.05.2026). — Текст : электронный.

7. Доклад о состоянии и использовании земель в Калининградской области за 2023 год / Управление Росреестра по Калининградской области. — Калининград : Росреестр, 2024. — 124 с. — Текст : непосредственный.

8. Волков, С. Н. Землеустройство : учебник для вузов / С. Н. Волков. — Москва : Государственный университет по землеустройству, 2019. — 992 с. — Текст : непосредственный.

9. Варламов, А. А. Земельный кадастр : в 6 томах. Том 1. Теоретические основы государственного земельного кадастра / А. А. Варламов. — Москва : КолосС, 2018. — 384 с. — Текст : непосредственный.

10. Липски, С. А. Цифровая трансформация управления земельно-имущественным комплексом / С. А. Липски // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. — 2023. — № 7. — С. 4–11. — Текст : непосредственный.

11. Овчинникова, Н. Г. Особенности проведения комплексных кадастровых работ в муниципальных образованиях / Н. Г. Овчинникова // Кадастровый вестник. — 2024. — № 2. — С. 12–19. — Текст : непосредственный.

12. Боровский, М. А. Комплексные кадастровые работы: правовые и организационные основы / М. А. Боровский // Имущественные отношения в Российской Федерации. — 2023. — № 5. — С. 22–31. — Текст : непосредственный.

GEOGRAPHY AND ANTHROPOLOGY

UDC 631(470.26)

Tsekoeva F.K., Prokopenko A.V. Analysis of agricultural development in the Nesterovsky municipal district of the Kaliningrad region

Анализ развития сельского хозяйства Нестеровского муниципального округа Калининградской области

Tsekoeva Fatima Kaspolovna,

Candidate of agricultural sciences, Director of the scientific and educational center "Land management, cadastre and land monitoring", the head of educational programs of the direction "Land management and cadastres", Immanuel Kant Baltic Federal University

Prokopenko Alina Vitalievna,

master's student in the field of "Land management and cadastres", Immanuel Kant Baltic Federal University

Цекоева Фатима Касполовна,

к.с.-х., доцент, Директор НОЦ "Землеустройство, кадастры и мониторинг земель", руководитель образовательных программ направления "Землеустройство и кадастры, ФГАОУ ВО Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта

Прокопенко Алина Витальевна,

магистрант направления подготовки «Землеустройство и кадастры», ФГАОУ ВО Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта

Abstract. *The article presents the results of research on the state of agriculture in the Nesterovsky Municipal District of the Kaliningrad region, the dynamics of agricultural work for the period from 2020 to 2023; on the role of the Nesterovsky Municipal District in the agricultural sector of the Kaliningrad region; on changes in the state of lands and the need to organize their rational use and protection.*

Keywords: *agriculture, agricultural enterprises, farming, subsidiary farming, crop production, animal husbandry, agro-industrial complex*

Аннотация. *В статье приведены результаты исследований о состоянии сельского хозяйства Нестеровского муниципального округа Калининградской области, динамика работы сельского хозяйства за период с 2020 по 2023 гг.; о роли Нестеровского муниципального округа в аграрном секторе Калининградской области.*

Ключевые слова: *сельское хозяйство, сельскохозяйственные предприятия, фермерское хозяйство, подсобное хозяйство, растениеводство, животноводство, агропромышленный комплекс.*

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

Нестеровский муниципальный округ Калининградской области расположен в юго-восточной части Калининградской области и граничит:

- на севере – с Краснознаменским районом,
- на востоке – с республикой Литва,
- на юге - с республикой Польша,
- на западе – с Гусевским и Озёрским районами.

Площадь территории Нестеровского округа - 106,1 тыс. га, в т.ч. города – 782 га.

Площадь сельскохозяйственных угодий – 66,9 тыс. га.

Лесной фонд – 28,1 тыс. га.

Водный фонд – 2,5 тыс. га.

По предварительным данным на 01.01.2024 года население округа в среднем составляло 11712 чел.

В муниципальном образовании функционирует 9 сельскохозяйственных предприятия; 15 фермерских хозяйств и более 2 тысяч личных подсобных хозяйств [1].

Нестеровский муниципальный округ занимает важное место в сельскохозяйственном секторе Калининградской области. Исходя из данных (таблица 1) в 2023 году площадь посевных площадей в округе составляет 34,6 тысяч гектаров, что делает его одним из крупнейших сельскохозяйственных округов региона.

Таблица 1

Посевные площади всех сельскохозяйственных культур в хозяйствах всех категорий (тысяч гектаров) [2].

	2019 г.	2020 г.	2021г.	2022 г.	2023 г.
Всего по области	272,3	287,4	298,2	303,1	304,7
Муниципальные округа:					
Багратионовский	15,4	20,0	21,3	22,6	24,4
Гвардейский	11,7	12,2	13,7	14,5	14,4
Гурьевский	16,4	18,3	19,2	21,5	22,1
Зеленоградский	10,0	10,0	10,5	9,9	9,6
Краснознаменский	15,2	15,6	17,0	17,0	16,1
Неманский	27,6	29,5	30,7	31,4	30,1
Нестеровский	35,7	34,2	35,1	34,9	34,6
Озерский	36,1	38,1	35,3	31,1	28,6
Полесский	12,1	12,9	13,4	14,9	16,0
Правдинский	28,4	28,5	31,4	28,5	31,8
Славский	18,1	19,5	20,1	22,1	22,2
Черняховский	22,5	26,0	25,8	31,7	31,3
Городские округа:					
г. Калининград	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8
Балтийский	0,2	0,2	0,2	0,7	0,9
Гусевский	21,8	21,5	23,5	21,0	21,1
Ладушкинский	...	0,0	0,0	0,1	0,0
Мамоновский	...	0,0	0,0	0,2	0,2
Пионерский	...	0,0	0,0	0,0	0,0
Светловский	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
Светлогорский	0,1	-	0,0	0,0	0,1
Советский	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Янтарный	0,1	-	0,0	0,0	0,0

Исходя из анализа распределения посевных площадей по выращиваемым культурам (рис. 1) в Нестеровском муниципальном округе большую часть посевных

площадей (48 процентов или 16,6 тыс. га) приходится на зерновые и зернобобовые культуры и треть на технические культуры (33 процента или 11,5 тыс. га). Площадь, занимаемая под картофель, составляет лишь 1 процент от общих посевных площадей муниципального округа.



Рис. 1 Распределение посевных площадей в Нестеровском муниципальном округе, 2023 г.

Можно сделать вывод, что специализацией Нестеровского муниципального округа являются зерновые и зернобобовые и технические культуры. Среди зерновых культур большая часть посевных площадей приходится на пшеницу, а среди технических культур на рапс.

Так же большое значение в сельском хозяйстве Нестеровского муниципального округа занимает животноводство.

Согласно данным (таблица 2), количество крупного рогатого скота в 2023 году уменьшилось на 20 % по сравнению с 2022 годом, а поголовье овец и коз в 2024 году по сравнению с 2023 годом увеличилось на 12,5 %.

Таблица 2

Поголовье скота в Нестеровском муниципальном округе
(на начало года; тысяч голов) [2].

	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.
Крупный рогатый скот	1,1	1,3	1,0	0,8	0,8
Свиньи	-	-	0,0	0,0	0,0
Овцы и козы	1,7	2,6	3,1	2,4	2,7

Производство скота и птицы на убой в живом весе в Нестеровском муниципальном округе в 2023 году составило 3,3 тысяч тонн, а производство молока 55,4 тысяч тонн.

Животноводство в округе представлено такими направлениями, как разведение крупного рогатого скота, где основной продукцией является молоко и разведение новой бесшерстной породы овец Дорпер специализирующейся на мясной продуктивности.

Нестеровский муниципальный округ является важным сельскохозяйственным округом Калининградской области. Округ обладает значительными посевными площадями, специализируясь на выращивании зерновых, зернобобовых и технических культур. В животноводстве сохраняется значительный объем производства молока, а также развивается мясное овцеводство. В целом, сельское хозяйство Нестеровского муниципального округа играет ключевую роль в экономике Калининградской области.

References

1. Администрация Нестеровского муниципального округа: официальный сайт. – Калининград. – Обновляется в течение суток. - URL: <https://admnestеров.gov39.ru/> (дата обращения: 20.12.2024). – Текст: электронный.

2 Сельское хозяйство в Калининградской области. 2024 Статистический сборник / Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Калининградской области (Калининградстат). – Калининград, Текст: непосредственный...2024 год. – 116 с.

3. Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации / Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии. — Москва: Росреестр — Текст: непосредственный...2006 год. — 2020. — 192 с.

GEOLOGY AND GEOPHYSICS

UDC 622.271:622.281:622.831.3:504.06

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Sharov P.E. Involvement of Sub-Standard Ores and Previously Left Pillars in Extraction within Caving Zones: Geomechanical Risk Assessment

Вовлечение в отработку забалансовых руд и ранее оставленных целиков в зонах
обрушения: геомеханическая оценка рисков

Arno Veronika Vladimirovna

Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan

Kolesnichenko Eva Pavlovna

Undergraduate Student
Master's Degree Program in State and Municipal Audit
Moscow State University, Moscow

Garifulina Irina Yurievna,

Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan

Sharov Pavel Egorovich,

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 3 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
Шаров Павел Егорович,
Студент 3 курса

Политехнический институт
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет

Abstract. *The article focuses on geomechanical risk assessment associated with involving sub-standard ores and previously left pillars in extraction within caving zones. The specific features of the stress-strain state of the rock mass under different scenarios of pillar and off-balance reserve recovery are analysed, and a calculation scheme is proposed for determining the safety factor based on the Mohr-Coulomb failure criterion. Using two scenarios – conservative and aggressive – it is demonstrated how increasing the degree of pillar involvement leads to higher stress concentrations and a reduction of the safety factor down to borderline values. The obtained results make it possible to justify the permissible extent of involving off-balance reserves and pillars in extraction and to identify areas where additional measures to enhance rock mass stability and control rock pressure are required.*

Keywords: *sub-standard ores, pillars, caving zone, geomechanical assessment, stress-strain state, safety factor, Mohr-Coulomb criterion, finite element method, rock pressure risks.*

Аннотация. *Статья посвящена геомеханической оценке рисков при вовлечении в отработку забалансовых руд и ранее оставленных целиков в зонах обрушения. Рассмотрены особенности напряжённо-деформированного состояния массива горных пород при различных сценариях доизвлечения целиков и забалансовых участков, а также предложена расчётная схема определения коэффициента запаса устойчивости на основе критерия Мора-Кулона. На примере двух сценариев – консервативного и агрессивного – показано, как увеличение степени вовлечения целиков приводит к росту концентрации напряжений и снижению коэффициента запаса устойчивости до пограничных значений. Результаты расчётов позволяют обосновать допустимую степень вовлечения забалансовых запасов и целиков в отработку, а также определить области, в которых необходимы дополнительные меры по повышению устойчивости массива и контролю горного давления.*

Ключевые слова: *забалансовые руды, целики, зона обрушения, геомеханическая оценка, напряжённо-деформированное состояние, коэффициент запаса устойчивости, критерий Мора-Кулона, метод конечных элементов, риски горного давления.*

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

Введение

В условиях истощения богатых руд и необходимости упрочнения минерально-сырьевой базы особое значение приобретает вовлечение в отработку забалансовых запасов и ранее оставленных целиков.

К забалансовым запасам относятся участки с пониженными содержаниями полезных компонентов или сложными горно-геологическими условиями, ранее считавшиеся экономически нецелесообразными для отработки. Оставленные целики формируют значительный резерв рудной массы, однако их доизвлечение сопряжено с повышенными геомеханическими рисками, особенно в зонах обрушения и сдвига пород. Вовлечение забалансовых руд и целиков позволяет увеличить коэффициент извлечения запасов и повысить эффективность недропользования, но требует обоснованной геомеханической оценки рисков.

Методы

Геомеханическая оценка рисков основана на расчёте напряжённо-деформированного состояния массива горных пород, определении коэффициентов запаса устойчивости целиков и анализе влияния различных сценариев вовлечения забалансовых руд.

Используются аналитические оценки, основанные на теории упругости, и численное моделирование методом конечных элементов, позволяющее учитывать сложную геометрию выработок, целиков и зоны обрушения. В качестве критерия устойчивости применён критерий Мора-Кулона с введением коэффициента запаса устойчивости для оценки допустимости выбранных технологических решений [1-4].

Расчётные зависимости

Коэффициент запаса устойчивости целика определяется выражением:

$$F_s = \sigma_{\text{allow}} / \sigma_{\text{max}}$$

где F_s — коэффициент запаса устойчивости; σ_{allow} — допустимое напряжение; σ_{max} — максимальное напряжение в наиболее нагруженной зоне целика.

Допустимое напряжение для массива пород можно оценить по формуле:

$$\sigma_{\text{allow}} = k \cdot \sigma_c$$

где σ_c — прочность породы на одноосное сжатие; k — коэффициент, учитывающий условия работы массива.

Результаты

Для иллюстрации рассмотрены два сценария вовлечения целиков и забалансовых руд в отработку. В сценарии А предполагается консервативная отработка с частичным вовлечением целиков и сохранением части несущих элементов [3, 5]. В сценарии В рассматривается агрессивная отработка с максимальной степенью вовлечения целиков и забалансовых участков. По данным расчётов методом конечных элементов определены максимальные напряжения в целике для каждого сценария, что позволило вычислить коэффициенты запаса устойчивости. Сравнение геомеханических параметров и рисков приведено в таблице 1.

Таблица 1

Показатель	Сценарий А	Сценарий В	Комментарий
Максимальное напряжение целике, МПа	18	30	Результаты МКЭ-расчёта
Допустимое напряжение, МПа	30	30	Принято $\sigma_{\text{allow}} = 0,5 \cdot \sigma_c$ при $\sigma_c = 60$ МПа
Коэффициент запаса F_s	1,67	1,00	Оценка по формуле $F_s = \sigma_{\text{allow}} / \sigma_{\text{max}}$
Степень вовлечения целиков, %	40–50	70–80	Доля объёма целиков, включённых в отработку
Оценка устойчивости	Устойчивое	Опасное	Классификация по значению F_s

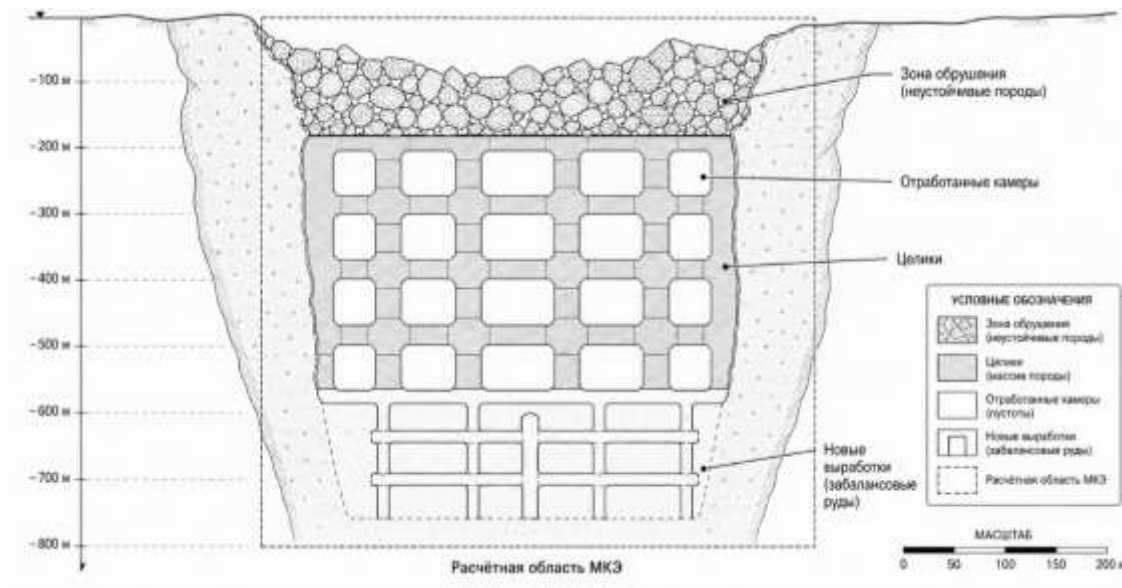


Рисунок 1 – Схема отработки блока с забалансовыми рудами и целиками в зоне обрушения.

Для анализа влияния степени вовлечения целиков на геомеханическую устойчивость построен график зависимости коэффициента запаса F_s от доли вовлечённых целиков (рис.2). Вторая диаграмма отражает сценарный экономический эффект в зависимости от допустимой степени вовлечения целиков с учётом ограничения по минимальному значению F_s . (рис.3)

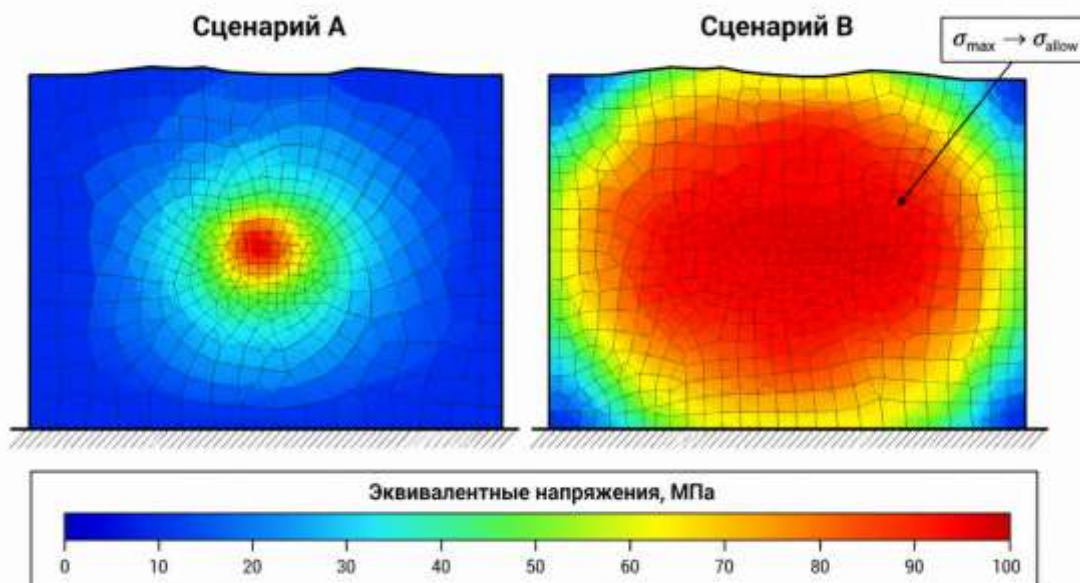


Рисунок 2 - График зависимости коэффициента запаса F_s от доли вовлечённых целиков

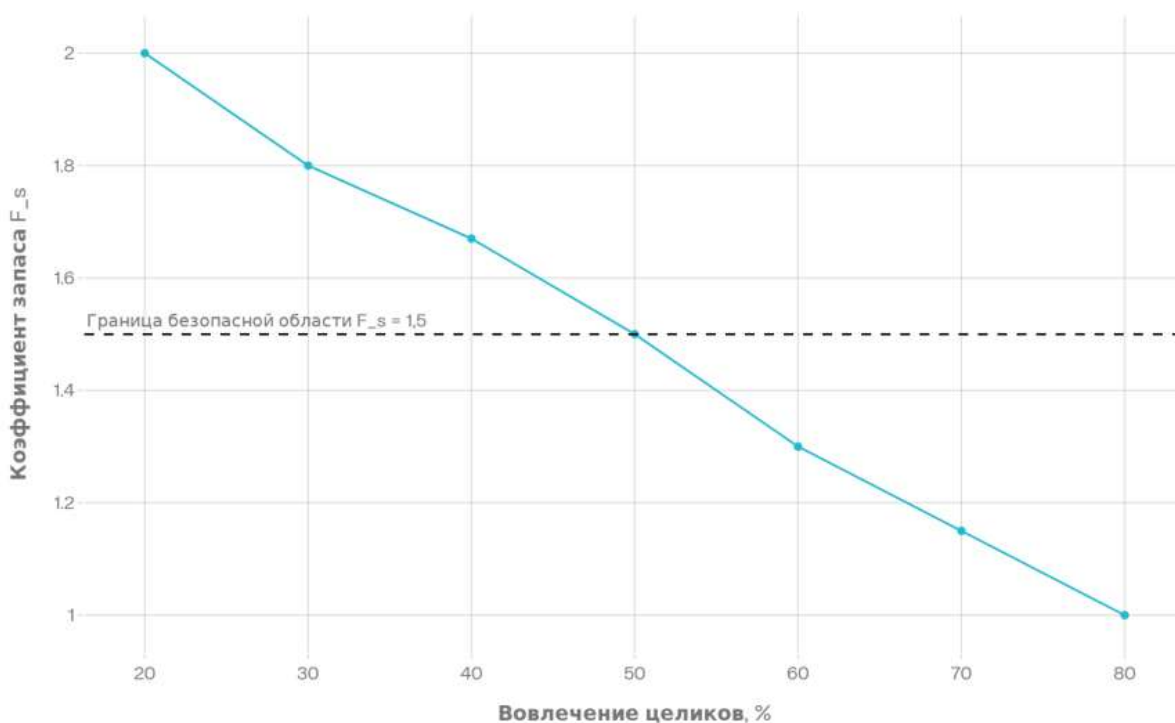


Рисунок 3 - Сценарный экономический эффект

Обсуждение

Сравнительный анализ сценариев показал, что консервативная схема вовлечения целиков (сценарий А) обеспечивает достаточный коэффициент запаса устойчивости, что позволяет осуществлять отработку без существенного увеличения риска горных ударов и обрушений. В то же время агрессивный сценарий (сценарий В), ориентированный на максимизацию текущей добычи, приводит к снижению коэффициента запаса до пограничных значений и требует либо отказа от реализации, либо применения специальных мер по усилению массива и контролю горного давления [6-8].

Выводы

Вовлечение забалансовых руд и ранее оставленных целиков в зонах обрушения является эффективным инструментом повышения полноты извлечения запасов и упрочнения ресурсной базы, однако требует обязательного геомеханического обоснования. Предложенный подход, включающий расчёт напряжённо-деформированного состояния массива и оценку коэффициента запаса устойчивости, позволяет количественно оценивать риски и выбирать допустимую степень вовлечения целиков. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании систем разработки и обосновании технологических схем доизвлечения запасов.

References

1. Рыльникова, М. В. Классификация техногенных георесурсов в свете перспектив комплексного освоения рудных месторождений / М. В. Рыльникова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М. : Горная книга, 2012. – № 2. – С. 43–48.
2. Трубецкой, К. Н. Эффективные технологии использования техногенных георесурсов – основа экологической безопасности освоения недр / К. Н. Трубецкой, В. Н. Захаров, Д. Р. Каплунов, М. В. Рыльникова // Горный журнал. – М. : Изд-во «Горная промышленность», 2016. – № 5. – С. 20–28. – DOI: 10.17580/gzh.2016.05.03.
3. Нуреев, Р. Р. Оценка воздействия отходов обогащения медных руд на поверхностные и подземные воды / Р. Р. Нуреев, М. А. Пашкевич, П. А. Харько // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12, № 4. – С. 169–179. – DOI: 10.46698/VNC.2022.37.95.013.
4. Гончар Н.В., Пикалов В.А., Соколовский А.В., Терешина М.А. Экологосбалансированная геотехнология освоения природных и техногенных георесурсов. Горная промышленность. 2024;(4):68–73. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-68-73>
5. Перспективы переработки техногенных отходов и техногенных месторождений в РФ [Электронный ресурс] / ЗолотеХ. – М. : ЗолотеХ, 2026. – 6 мая. – Режим доступа: https://zolteh.ru/technology_equipment/perspektivy_pererabotki_tekhnogennykh_otkhodov_i_tekhnogennykh_mestorozhdeniy_v_rf/ (дата обращения: 20.05.2026).
6. Техногенные месторождения [Электронный ресурс] // Neftegaz.RU. – М. : Медиа-группа Neftegaz.RU, 2014. – Режим доступа: <https://neftegaz.ru/tech-library/mestorozhdeniya/142159-tekhnogennye-mestorozhdeniya/> (дата обращения: 20.05.2026).
7. Вадулина, Н. В. Разработка способа утилизации отходов горно-обогатительных комбинатов созданием активных фильтрующих обезжелезивающих материалов / Н. В. Вадулина, Н. Х. Абдрахманов, А. В. Федосов, И. И. Бадртдинова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 11. – С. 37–43.
8. Рубанов, Ю. К. Перспективы переработки горнопромышленных отходов в контексте устойчивого развития экономики / Ю. К. Рубанов, В. И. Михнев, К. Ли, Ю. С. Кузнецова // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2025. – Вып. 3. – С. 17–23.

UDC 622.013:330.322

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Sharov P.E.
**Quantitative models for decision support in mine planning and
assessment of subsurface investment attractiveness**

Количественные модели поддержки принятия решений при планировании горных работ и оценке инвестиционной привлекательности недр

Arno Veronika Vladimirovna

Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan

Kolesnichenko Eva Pavlovna

Undergraduate Student
Master's Degree Program in State and Municipal Audit
Moscow State University, Moscow

Garifulina Irina Yurievna,

Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan

Sharov Pavel Egorovich,

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 3 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
Шаров Павел Егорович,
Студент 3 курса

Политехнический институт
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет»

Abstract. *The article proposes an applied framework for quantitative decision support in mine planning and the assessment of subsoil investment attractiveness. The integration of technical and financial models is based on the premise that early-stage mining-economic studies, such as Preliminary Economic Assessment (PEA), combine mine planning, production forecasting, capital and operating costs, as well as life-of-mine modeling and cash flow estimation. It is shown that traditional evaluation using DCF/NPV is useful as a baseline project screening tool; however, under conditions of high geological, price, and technological uncertainty, it should be supplemented with scenario analysis, risk modeling, and real options logic.*

The key result is the development of an integrated system: block/schedule-based mine planning → production forecasting → cash flow calculation → evaluation of NPV, IRR, PI, and payback period → risk-adjusted interpretation of investment attractiveness. Using a demonstration dataset, the project's economic indicators were calculated, and sensitivity analysis was performed with respect to metal prices, recovery rates, and capital expenditures. The results indicate that decisions on subsoil development should not be based on a single indicator, but rather on a consistent set of technological, cost, and risk metrics.

Keywords: mine planning; decision support; subsoil investment attractiveness; NPV; IRR; discounted cash flow; scenario analysis; real options; PEA; project sensitivity.

Аннотация. В статье предложена прикладная структура для количественной поддержки принятия решений при планировании горных работ и оценке инвестиционной привлекательности недр. Основанием для интеграции технических и финансовых моделей служит то, что ранние горно-экономические исследования типа Preliminary Economic Assessment (PEA) объединяют план горных работ, прогноз добычи, капитальные и операционные затраты, а также расчет жизненного цикла рудника и денежных потоков. Показано, что традиционная оценка по DCF/NPV полезна как базовый контур отбора проектов, однако при высокой геологической, ценовой и технологической неопределенности ее целесообразно дополнять сценарным анализом, моделированием рисков и логикой реальных опционов.

Ключевой результат состоит в формировании связанной системы: блочное/календарное планирование горных работ → прогноз производственных показателей → расчет денежных потоков → оценка NPV, IRR, PI и срока окупаемости → риск-корректированная интерпретация инвестиционной привлекательности. На демонстрационном наборе исходных данных рассчитаны экономические показатели проекта и выполнен анализ чувствительности к цене металла, извлечению и величине капитальных затрат. Полученные результаты показывают, что положительное решение по освоению недр должно приниматься не по одному показателю, а по согласованному набору технологических, стоимостных и риск-метрик.

Ключевые слова: горное планирование; поддержка принятия решений; инвестиционная привлекательность недр; NPV; IRR; дисконтированный денежный поток; сценарный анализ; реальные опционы; PEA; чувствительность проекта.

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

Введение

Цифровизация горной промышленности усилила роль количественных моделей как инструмента выбора технических и инвестиционных решений на этапах от концепции отработки до подготовки технико-экономического обоснования. На ранних стадиях проекта именно экономическая оценка типа PEA используется для предварительного подтверждения жизнеспособности проекта, причем в нее обычно включаются параметры добычи, переработки, капитальных затрат, срок службы рудника и денежные потоки.

Проблема состоит в том, что даже формально положительный базовый NPV может быть недостаточен для принятия решения, если не учтены вариативность содержания полезного компонента, неопределенность извлечения, колебания цен, задержки ввода мощностей и институциональные риски недропользования. В литературе и отраслевой практике подчеркивается, что PEA отвечает на вопрос о потенциальной жизнеспособности актива, а более поздние стадии PFS/FS повышают надежность инженерных и стоимостных оценок. Поэтому задача исследования заключается в разработке интегрированной количественной схемы, соединяющей горное планирование и инвестиционную оценку в единую систему поддержки принятия решений [1-3,12].

Цель исследования — показать, как количественные модели могут быть использованы для выбора параметров плана горных работ и для оценки инвестиционной привлекательности недр на основе системы взаимосвязанных технико-экономических показателей.

Задачи исследования:

- формализовать входные параметры горного проекта;
- представить расчетный аппарат оценки денежных потоков и инвестиционной эффективности;
- выполнить демонстрационный расчет по годам жизни рудника;
- проанализировать чувствительность результатов к ключевым факторам;
- сформулировать выводы для принятия решений по освоению недр.

Материалы и методы

В качестве методической базы использована логика ранней и последующей стадий горно-экономической оценки: PEA формирует первичную картину жизнеспособности, тогда как PFS и FS повышают точность инженерных решений и оценок затрат. С точки зрения инвестиционного анализа базовой моделью является дисконтирование денежных потоков, дополненное показателями внутренней нормы доходности, индекса прибыльности и срока окупаемости; при высокой неопределенности к этим методам добавляются сценарный анализ и подход реальных опционов. Концептуальная схема представлена на рисунке 1.

Очевидно, что инвестиционная оценка не автономна: она встроена в цепочку решений, начинающуюся с геолого-технологической модели и заканчивающуюся выбором варианта освоения участка недр.

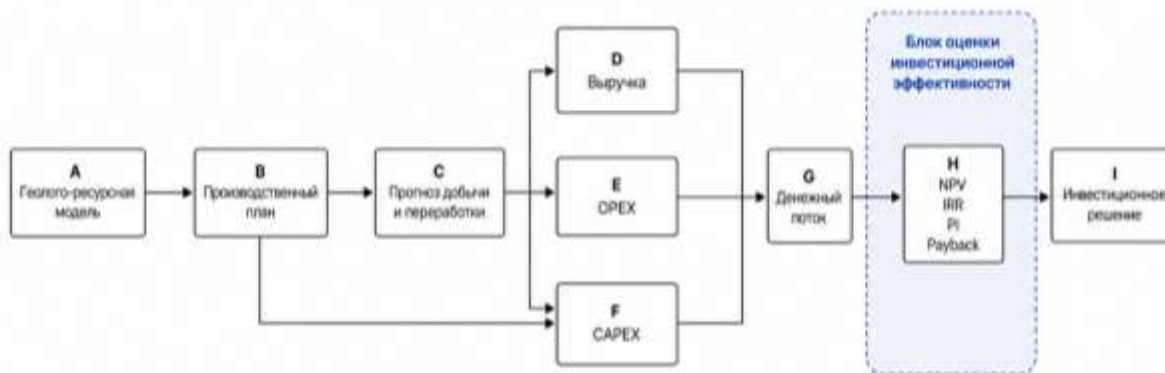


Рисунок 1 – Логика организации потока расчетов

Формулы расчета

Годовая масса извлекаемого металла рассчитывается по формуле 1:

$$Q_t = M_t \cdot g_t \cdot r_t \quad 1.$$

где M_t — объем переработки руды в году t , т; g_t — среднее содержание металла в долях единицы; r_t — коэффициент извлечения.

Годовая выручка определяется как ф-ла.2:

$$R_t = Q_t \cdot P_t \quad 2.$$

где P_t — цена единицы товарного металла.

Операционный денежный поток до налогообложения ф-ла.3:

$$OCF_t = R_t - OPEX_t \quad 3.$$

Чистый денежный поток проекта ф-ла.4:

$$FCF_t = R_t - OPEX_t - CAPEX_t - TAX_t \quad 4.$$

Чистая приведенная стоимость ф-ла.5:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{FCF_t}{(1+k)^t} \quad 5.$$

где k — ставка дисконтирования.

Внутренняя норма доходности определяется из условия ф-ла.6:

$$\sum_{t=0}^T \frac{FCF_t}{(1+IRR)^t} = 0 \quad 6.$$

Индекс прибыльности ф-ла. 7:

$$PI = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{FCF_t^+}{(1+k)^t}}{|FCF_0|} \quad 7.$$

Для анализа устойчивости использован коэффициент чувствительности NPV к фактору x ф-ла.8:

$$S_x = \frac{\Delta NPV / NPV_0}{\Delta x / x_0} \quad 8.$$

Исходные данные демонстрационного проекта

Для иллюстрации применен условный проект освоения месторождения цветного металла открытым способом, соответствующий логике ранней технико-экономической оценки. РЕА обычно включает тип добычи, план горных работ, прогноз производства,

капитальные и операционные затраты, а также риски и неопределенности. В демонстрационном расчете приняты следующие параметры см.табл.1.

Таблица 1

Показатель	Обозначение	Значение
Срок проекта, лет	T	6
Ставка дисконтирования	k	12%
Год 0 CAPEX	CAPEX0	180 млн долл.
Поддерживающий CAPEX, годы 1-5	CAPEXs	12 млн долл./год
Поддерживающий CAPEX, год 6	CAPEX6	10 млн долл.
Переработка руды	M	2,0 млн т/год
Среднее содержание металла	g	1,5%
Извлечение	r	88%
Цена металла	P	8 500 долл./т
OPEX	OPEX	95 млн долл./год
Налог на прибыль	TAX	20% от прибыли до налога

По таблице 1 видно, что структура входных параметров объединяет производственные и финансовые переменные. Это важно для практики планирования горных работ, поскольку изменение производительности, извлечения или содержания руды сразу транслируется в инвестиционную оценку проекта [3-4].

Результаты

Базовый расчет по проекту

При переработке 2,0 млн т руды в год, содержания 1,5% и извлечении 88% годовой выпуск металла составит:

$$Q = 2,000,000 \cdot 0,015 \cdot 0,88 = 26,400 \text{ т}$$

Тогда годовая выручка составит:

$$R = 26,400 \cdot 8,500 = 224,4 \text{ млн долл.}$$

При OPEX 95 млн долл. прибыль до налогообложения и до учета, поддерживающего CAPEX равна 129,4 млн долл. После учета, поддерживающего CAPEX 12 млн долл. в годы 1-5 налогооблагаемая база составляет 117,4 млн долл., налог — 23,48 млн долл., а свободный денежный поток — 93,92 млн долл. В год 6 при поддерживающем CAPEX 10 млн долл. свободный денежный поток равен 95,52 млн долл. (табл.2)

Таблица 2.

Год	Выручка, млн долл.	OPEX, млн долл.	CAPEX, млн долл.	Налог, млн долл.	FCF, млн долл.	Дисконт-фактор 12%	PV FCF, млн долл.
0	0,00	0,00	180,00	0,00	-180,00	1,000	-180,00
1	224,40	95,00	12,00	23,48	93,92	0,893	83,86
2	224,40	95,00	12,00	23,48	93,92	0,797	74,88
3	224,40	95,00	12,00	23,48	93,92	0,712	66,86
4	224,40	95,00	12,00	23,48	93,92	0,636	59,71
5	224,40	95,00	12,00	23,48	93,92	0,567	53,31
6	224,40	95,00	10,00	23,88	95,52	0,507	48,41
Итого							206,03

По таблице 2 суммарная приведенная стоимость положительных потоков составляет 386,03 млн долл., а чистая приведенная стоимость проекта — 206,03 млн долл.

Положительное значение NPV указывает на экономическую реализуемость проекта в базовом сценарии, что согласуется с логикой применения NPV и IRR для проверки feasibility в технических отчетах по горным проектам [4,6]. Простая окупаемость достигается между 2-м и 3-м годами, а дисконтированная — между 3-м и 4-м годами эксплуатации.

Дополнительно рассчитаны агрегированные показатели инвестиционной эффективности (табл.3).

Таблица 3

Показатель	Значение	Интерпретация
NPV, млн долл.	206,03	Значительный запас стоимости
IRR	45,6%	Существенно выше ставки дисконтирования
PI	2,14	На 1 долл. вложений приходится 2,14 долл. PV притоков
Простая окупаемость	1,92 года	Быстрый возврат капитала
Дисконтированная окупаемость	3,33 года	Проект устойчив при учете стоимости капитала

По данным таблицы 3 базовый вариант проекта выглядит инвестиционно привлекательным: IRR существенно превышает 12%, а PI больше единицы. Однако для недропользования этого недостаточно, поскольку ранние оценки содержат существенную долю неопределенности и потому требуют чувствительного и сценарного анализа

Сценарный анализ

Для проверки устойчивости были заданы три сценария: пессимистический, базовый и оптимистический. В сценариях варьировались цена металла, извлечение и стартовый CAPEX, поскольку именно эти параметры чаще всего определяют отклонение фактического результата от планового на ранних стадиях проекта (табл.4) .

Таблица 4

Сценарий	Цена, долл./т	Извлечение, %	Стартовый CAPEX, млн долл.	NPV, млн долл.	IRR
Пессимистический	7 500	84	210	80,93	24,8%
Базовый	8 500	88	180	206,03	45,6%
Оптимистический	9 300	90	170	313,77	61,0%

Из расчетов следует, что даже пессимистический сценарий сохраняет положительный NPV, что повышает устойчивость инвестиционного решения. Вместе с тем диапазон разброса NPV от 80,93 до 313,77 млн долл. показывает, что качество исходной ресурсной и технологической информации критически влияет на оценку инвестиционной привлекательности недр [4,6,10].

Рассмотрим локальную чувствительность NPV к изменению факторов на $\pm 10\%$ (табл.5).

Таблица 5

Фактор	NPV при -10%, млн долл.	NPV при +10%, млн долл.	Оценка влияния
Цена металла	130,95	281,12	Очень высокая
Извлечение	130,95	281,12	Очень высокая
ОРЕХ	155,30	256,76	Высокая
Стартовый CAPEX	224,03	188,03	Средняя

Из расчетов (табл.5) следует, что наиболее чувствительными факторами выступают цена металла и коэффициент извлечения. Это означает, что при планировании горных работ максимальный прирост стоимости может дать не только оптимизация календаря добычи, но и технологические мероприятия, повышающие извлечение и стабильность качества руды на фабрике.

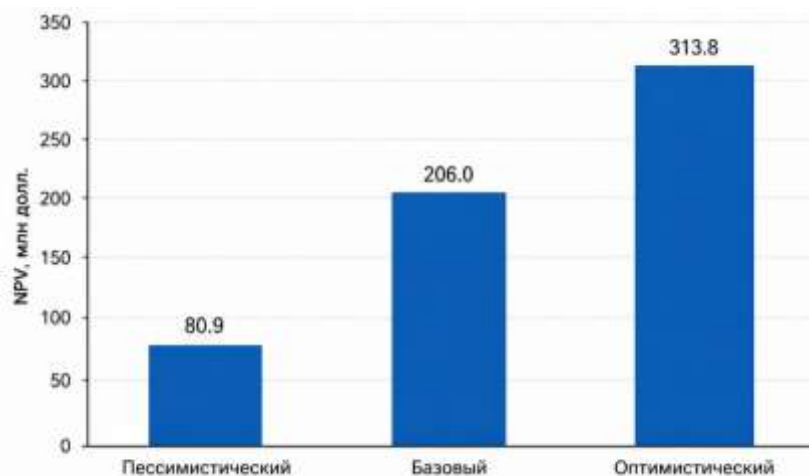


Рисунок 2 - зависимость NPV от сценария (млн.долл)

Диаграмма показывает, что проект остаётся инвестиционно привлекательным во всех рассмотренных сценариях, но размер создаваемой стоимости существенно зависит от набора допущений по ключевым факторам. В пессимистическом варианте NPV составляет около 80,9 млн долл., то есть даже при неблагоприятных условиях проект генерирует положительную чистую приведённую стоимость и сохраняет экономический смысл, хотя запас прочности относительно невелик [5-7].

В базовом сценарии NPV возрастает до примерно 206,0 млн долл., что свидетельствует о значительном «буфере» по отношению к исходным инвестициям и комфортном уровне доходности для инвестора. Оптимистический сценарий демонстрирует максимальное значение NPV порядка 313,8 млн долл., показывая, что

при благоприятном сочетании цен, извлечения и затрат проект превращается в высокодоходный актив. Сопоставление трёх столбцов визуально подчёркивает высокую чувствительность стоимости проекта к изменениям исходных параметров и необходимость учитывать диапазон возможных исходов, а не только базовую оценку. На рисунке 3 приведен график кумулятивного дисконтированного денежного потока.

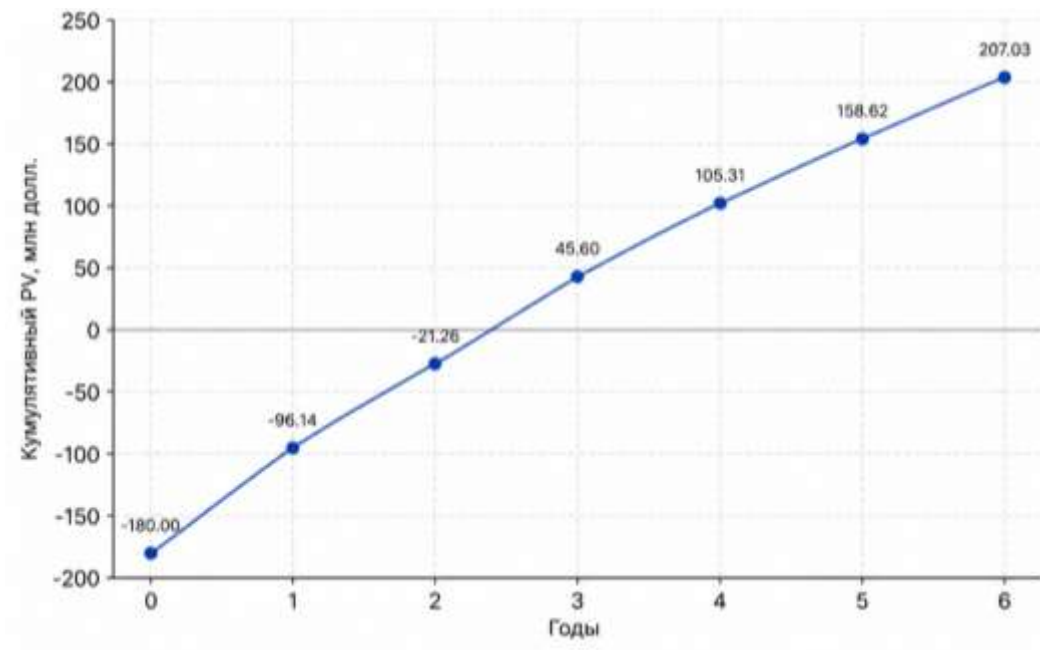


Рисунок 3 - График кумулятивного дисконтированного денежного потока (млн.долл.).

График кумулятивного дисконтированного денежного потока показывает, как проект последовательно «выбирается» из зоны убытков и выходит в зону прибыли в приведённых (дисконтированных) ценах. В нулевой год значение составляет около -180 млн долл., что соответствует первоначальным капитальным вложениям, полностью формирующим отрицательный стартовый баланс [6, 8-9].

К концу 1-го года накопленный дисконтированный поток увеличивается до примерно -96 млн долл., а к концу 2-го года — до около -21 млн долл., то есть за два операционных года проект отрабатывает значительную часть первоначального CAPEX, но ещё остаётся в отрицательной зоне. Между 3-м и 4-м годами кривая пересекает нулевой уровень (от ~45,6 до ~105,3 млн долл.), что соответствует дисконтированному сроку окупаемости: именно в этот интервал инвестор возвращает свои приведённые вложения и начинает получать чистый доход.

Дальнейший рост кривой до примерно 207 млн долл. к концу 6-го года показывает, что после момента окупаемости проект продолжает генерировать значительный положительный дисконтированный поток. Наклон линии после точки

безубыточности остаётся достаточно крутым, что свидетельствует о высоком запасе прочности: даже при возможном снижении цен или ухудшении производственных параметров проект имеет потенциал сохранить положительный NPV. Для лиц, принимающих решения, такой график наглядно связывает риск возврата капитала с временем: чем позже кривая пересекает ноль и чем более пологим становится её рост, тем выше чувствительность проекта к неблагоприятным изменениям внешней среды [10,12].

Обсуждение. Полученные результаты подтверждают, что количественные модели поддержки принятия решений в горной промышленности должны строиться как связка производственной и финансовой подсистем. PEA рассматривается именно как ранняя интегрированная оценка, включающая параметры добычи, переработки, затрат, рисков и ожидаемой жизнеспособности проекта, а последующие стадии PFS/FS повышают достоверность этих оценок.

С практической точки зрения базовый DCF-подход обеспечивает удобную и сопоставимую основу для отбора проектов, однако он не полностью отражает ценность управленческой гибкости. Публикации по реальным опционам в горной отрасли подчеркивают, что DCF и NPV целесообразно дополнять опционной логикой, особенно для ранних стадий, когда можно отложить запуск, изменить масштаб проекта или скорректировать технологическую схему в ответ на новую информацию.

Для горного планирования это означает следующее:

- при выборе последовательности обработки блоков следует максимизировать не только текущий денежный поток, но и устойчивость проекта к падению цены и извлечения;

- при сравнении вариантов технологической схемы нужно оценивать вклад в NPV через изменение извлечения, разубоживания и OPEX;

- при оценке инвестиционной привлекательности недр следует рассматривать пакет показателей: NPV, IRR, PI, окупаемость, сценарный диапазон и чувствительность.

Таким образом, количественная модель становится не просто расчетом отчетных коэффициентов, а механизмом согласования интересов инженеров, экономистов и инвесторов. Особенно важно это для активов с высокой геологической неопределенностью, где точечная оценка без анализа сценариев способна завышать надежность выводов.

Выводы. Количественные модели поддержки принятия решений при планировании горных работ должны интегрировать геолого-технологические параметры и инвестиционные показатели в единую расчетную систему, поскольку

ранние горно-экономические оценки типа РЕА прямо связывают план горных работ с денежными потоками и жизнеспособностью проекта.

В демонстрационном расчете базовый проект имеет положительный NPV 206,03 млн долл., IRR 45,6% и PI 2,14, что характеризует его как инвестиционно привлекательный в пределах принятых предпосылок.

Вывод по таблицам 4 и 5 состоит в том, что ключевыми драйверами стоимости выступают цена металла и коэффициент извлечения; следовательно, качество переработки и устойчивость товарного выпуска имеют не меньшую значимость, чем собственно объем добычи.

Вывод по рисункам 2 и 3 состоит в том, что даже при положительном базовом NPV необходимо анализировать диапазон сценариев и временной профиль возврата капитала, так как именно они определяют риск инвестиционного решения.

Для повышения качества оценки инвестиционной привлекательности недр базовую модель DCF следует дополнять сценарным анализом, чувствительностью и, по возможности, моделями реальных опционов, что особенно важно для ранних стадий проектов с высокой неопределенностью [9-12].

Практическая значимость

Представленная структура может использоваться при подготовке учебных и прикладных технико-экономических материалов по недропользованию, при сравнении вариантов календарного планирования, а также при предварительном отборе инвестиционных проектов в горной отрасли. Она особенно полезна на стадиях, где необходимо быстро связать горно-технические параметры проекта с инвестиционной оценкой и показать инвестору, какие факторы формируют стоимость актива и риск отклонения результата от плана.

References

1. Козлов С.В., Плотников Р.В. Систематизация атрибутов многокритериальных моделей в горнодобывающей отрасли // Недропользование и транспортные системы. 2024. Т. 14. № 1. С. 25–57. DOI: 10.18503/SMTS-2024-14-1-25-57.
2. Елохова И.В., Плотников Р.В. Подход к моделированию инвестиционной привлекательности отрасли в региональном аспекте // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2024. Т. 17. № 1. С. 110–125. DOI: 10.15838/esc.2024.1.91.6.
3. Иванова Н.П., Сафронов Д.А. Оценка инвестиционной привлекательности угольной отрасли России // Экономика и предпринимательство. 2021. № 8. С. 250–258.

4. Гилярёва Л.В., и др. Ключевые показатели проектных управленческих решений для устойчивого функционирования геотехнологических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2026. № 2-1. С. 182–196.
5. Плотников Р.В., Елохова И.В. Особенности оценки инвестиционной привлекательности компаний реального сектора экономики // Информационное общество. 2025. № 1. С. 70–78.
6. Третьяков А.В. Инвестиционная привлекательность минерально-сырьевого комплекса России: современные тенденции и факторы роста // Недра XXI век. 2022. № 5. С. 52–59.
7. Бурлин Е.Б. Оценка инвестиционной привлекательности корпорации: методический подход // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15. № S1. С. 45–60.
8. Ряхлин М.Ю. Техничко-экономический аудит в горной промышленности: методические подходы и ключевые показатели // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 10. С. 120–135.
9. Сидоров В.В., Лопатников А.В. Оценка стоимости непроизводящих горнодобывающих компаний: проблемы и решения // Металлы. 2025. № 5. С. 35–47.
10. Иванов Д.С., Фёдоров П.Н. Потенциал развития горнодобывающего сектора России: экономический анализ и сценарное моделирование // Уголь. 2024. № 12. С. 15–23.
11. Смирнова Е.В. Технологические и маркетинговые тенденции в горнодобывающей промышленности и их влияние на инвестиционную привлекательность проектов // Горная промышленность. 2026. № 1. С. 34–45.
12. Лебедев А.Г. Цифровизация горнодобывающей отрасли и её влияние на методы оценки инвестиционных проектов // Экономика и управление в машиностроении. 2023. № 4. С. 90–99.

UDC 622.271:528.8:004.9

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Lomakina N.E., Sharov P.E. Assessment of Deformations of Quarry Walls and Waste Dumps Based on Real-Time Laser Scanning and Photogrammetry Data

Оценка деформаций бортов карьеров и отвалов на основе данных лазерного сканирования и фотограмметрии в режиме реального времени

Arno Veronika Vladimirovna

Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan

Kolesnichenko Eva Pavlovna

Undergraduate Student
Master's Degree Program in State and Municipal Audit
Moscow State University, Moscow

Lomakina Natalia Evgenievna,

Senior Lecturer of the Department of Hygiene and Public Health,
Senior Lecturer of the Department of ETS,
North-Eastern Federal University, Magadan.

Sharov Pavel Egorovich,

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 3 курса
направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит»

ВШГА МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Ломакина Наталья Евгеньевна,

Старший преподаватель кафедры ГиГД
ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан

Шаров Павел Егорович,

Студент 3 курса

Политехнический институт

ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет»

Abstract. *The article addresses the assessment of deformations of quarry walls and waste dumps based on the integration of terrestrial laser scanning and photogrammetry data used in near-real-time monitoring. Terrestrial laser scanning provides dense point clouds and highly accurate geometric description of pit walls, benches and dumps, while UAV-based photogrammetry enables rapid coverage of large areas and records texture-related indicators of cracking and local displacements. Current studies treat both methods as complementary monitoring tools, and automated processing of multi-temporal point clouds makes it possible to delineate subsidence zones, landslide processes, surface tilts and curvature anomalies. The paper proposes a calculation framework for combining the outputs of the two methods, considers displacement, deformation-rate and integrated hazard indicators, and presents an illustrative case showing the transition from a stable to a hazardous state.*

Keywords: *quarry wall, waste dump, deformation, laser scanning, photogrammetry, real-time monitoring, point cloud, geomechanical hazard, UAV, deformation risk index.*

Аннотация. *Статья посвящена оценке деформаций бортов карьеров и отвалов на основе интеграции данных наземного лазерного сканирования и фотограмметрии, применяемых в режиме, близком к реальному времени. Наземное лазерное сканирование обеспечивает плотное облако точек и высокую точность геометрического описания бортов, уступов и отвалов, а фотограмметрия с беспилотных платформ позволяет быстро покрывать значительные площади и фиксировать текстурные признаки трещинообразования и локальных смещений.*

В современных исследованиях оба метода рассматриваются как взаимодополняющие инструменты мониторинга деформаций, а автоматизированная обработка разновременных облаков точек позволяет выделять зоны оседаний, оползневых процессов, наклонов и кривизны поверхности. В статье предложен расчётный подход к объединению результатов двух методов, рассмотрены показатели смещений, скоростей деформаций и интегрального индекса риска, а также приведён иллюстративный пример оценки перехода от стабильного состояния к опасному.

Ключевые слова: *борт карьера, отвал, деформации, лазерное сканирование, фотограмметрия, мониторинг в реальном времени, облако точек, геомеханический риск, БВС, индекс деформационного риска.*

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

Введение

Контроль деформаций бортов карьеров и отвалов относится к числу ключевых задач геомеханического обеспечения открытых горных работ, поскольку развитие смещений, трещинообразования и оползневых процессов непосредственно влияет на промышленную безопасность, устойчивость откосов и непрерывность добычи. Классические маркшейдерские методы обеспечивают высокую точность точечных наблюдений, однако для быстро меняющейся геометрии карьерных откосов и отвалов всё большее значение приобретают технологии, дающие сплошное пространственное описание поверхности - наземное лазерное сканирование и фотограмметрия.

Наземное лазерное сканирование позволяет получать облака точек высокой плотности на расстояниях до нескольких километров и использовать их для построения цифровой модели поверхности, расчёта объёмов, профилей, структурных линий и мониторинга деформаций. Фотограмметрия, в том числе с применением беспилотных воздушных судов, обеспечивает быстрое обновление модели объекта и дополнительную информацию о морфологии поверхности и трещинной структуре, что особенно важно для выявления опасных участков. В современных алгоритмах обработки данных основное внимание уделяется сравнению разновременных облаков точек и автоматизации расчётов смещений, наклонов и кривизны, пригодных для оперативного предупреждения об опасных деформациях [1-4].

Цель статьи - разработать и продемонстрировать подход к оценке деформаций бортов карьеров и отвалов на основе интегрированного использования данных

лазерного сканирования и фотограмметрии в режиме реального времени, включая расчёт показателей смещения, скорости деформации и индекса риска.

Методы

Информационная база и измерительная схема

В опубликованных исследованиях наземное лазерное сканирование рассматривается как эффективный инструмент мониторинга бортов, откосов, уступов и отвалов, в том числе в суровых климатических условиях и на крупных открытых горных выработках. Для фотограмметрического сопровождения используются данные аэрофотосъёмки с БВС, которые позволяют оперативно получать трёхмерную модель больших участков и затем сопоставлять её с эталонной поверхностью или лазерным облаком точек.

Типовая схема мониторинга включает: (1) формирование базовой поверхности, (2) повторные циклы сканирования и фотограмметрии, (3) совмещение наборов данных в единой системе координат, (4) расчёт разностей по высоте и пространственным смещениям, (5) выделение зон превышения порогов по смещению и скорости деформации. Такой подход позволяет анализировать не отдельные реперы, а всю потенциально опасную площадь объекта, что особенно важно для протяжённых бортов карьеров и тел отвалов.[1-3]

Расчётные зависимости

Базовый показатель деформации поверхности между двумя циклами съёмки определяется как модуль вектора смещения точки или ячейки модели:

$$D_i = \sqrt{(x_{i2} - x_{i1})^2 + (y_{i2} - y_{i1})^2 + (z_{i2} - z_{i1})^2}$$

где D_i - смещение i -й точки, а индексы 1 и 2 соответствуют последовательным циклам наблюдений.[2-4]

Средняя скорость деформации для интервала наблюдений рассчитывается как:

$$V_i = \frac{D_i}{\Delta t}$$

где Δt - интервал между циклами мониторинга в сутках. Для совместного использования результатов лазерного сканирования и фотограмметрии можно принять взвешенную оценку среднеквадратической ошибки:

$$\sigma_c = \left(\frac{1}{\sigma_{TLS}^2} + \frac{1}{\sigma_{PH}^2} \right)^{-1/2}$$

где σ_{TLS} - среднеквадратическая ошибка лазерного сканирования, σ_{PH} - среднеквадратическая ошибка фотограмметрической модели. Такая формула отражает снижение итоговой неопределённости при совместном использовании независимых измерений.

Для оперативной оценки опасности предлагается интегральный индекс деформационного риска:

$$R = 0.6 \cdot \frac{D_{max}}{\sigma_c} + 0.4 \cdot V_{max}$$

где D_{max} - максимальное смещение в контролируемом секторе, V_{max} - максимальная скорость деформации. Весовые коэффициенты могут уточняться под конкретный объект, однако приоритет смещения как более устойчивого индикатора обоснован практикой анализа разновременных облаков точек.

Классы опасности

Для целей инженерной интерпретации принят следующий пример классификации:

$R < 2$ - низкий риск;

$2 \leq R < 4$ - средний риск;

$R \geq 4$ - высокий риск.

Такая шкала является расчётной и должна адаптироваться к фактическим геомеханическим условиям месторождения, литологии и истории деформаций.

Результаты

Иллюстративный расчёт

Для демонстрации метода рассмотрен условный сектор борта карьера, по которому выполнено шесть циклов мониторинга.

В каждом цикле определены максимальное смещение, скорость деформации, а также типичные ошибки по данным наземного лазерного сканирования и фотограмметрии.

На основе этих параметров рассчитаны комбинированная ошибка и индекс риска.

Такой пример не заменяет натурные наблюдения, но показывает логику интерпретации данных в системе оперативного мониторинга.

Таблица 1

Расчёт показателей деформации и риска

Период	Максимальное смещение, мм	Скорость, мм/сут	RMS E TLS, мм	RMSE фотограмметрии, мм	Комбинированная ошибка, мм	Индекс риска R	Класс риска
T1	6	0.4	7	15	5.76	0.78	Низкий
T2	9	0.6	7	14	5.63	1.20	Низкий
T3	14	0.9	8	14	6.95	1.57	Низкий
T4	22	1.5	8	13	6.81	2.54	Средний
T5	35	2.4	8	13	6.81	4.04	Высокий
T6	58	3.9	9	12	7.20	6.39	Высокий

Рост максимального смещения от 6 до 58 мм при одновременном увеличении скорости деформации от 0,4 до 3,9 мм/сут показывает переход контролируемого участка из стабильного состояния в зону опасного развития деформаций (рис.1).

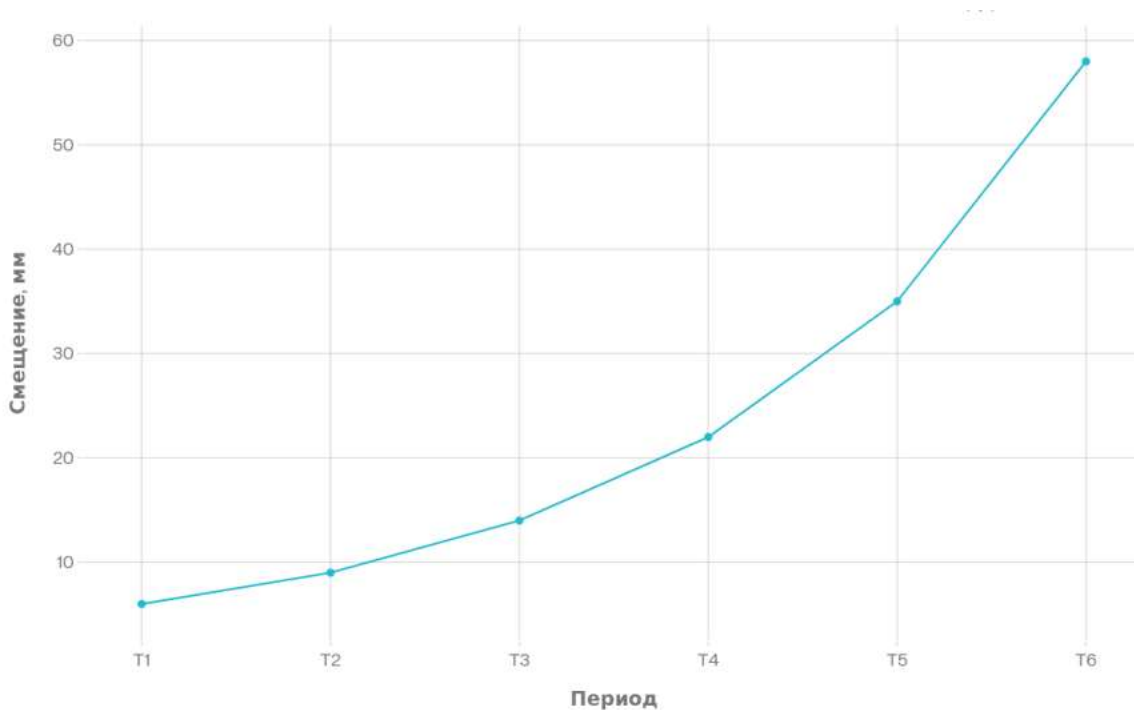


Рисунок 1 – Смещение борта карьера по циклам мониторинга

Практически это означает, что начиная с периода T4 требуется усиленный контроль, а при достижении уровней T5–T6 необходимы инженерные меры реагирования, вплоть до ограничения работ в опасном секторе.

Динамика смещений по циклам мониторинга показывает ускоряющийся характер деформации, что характерно для участков, приближающихся к оползневому или обвальному сценарию (рис.1).

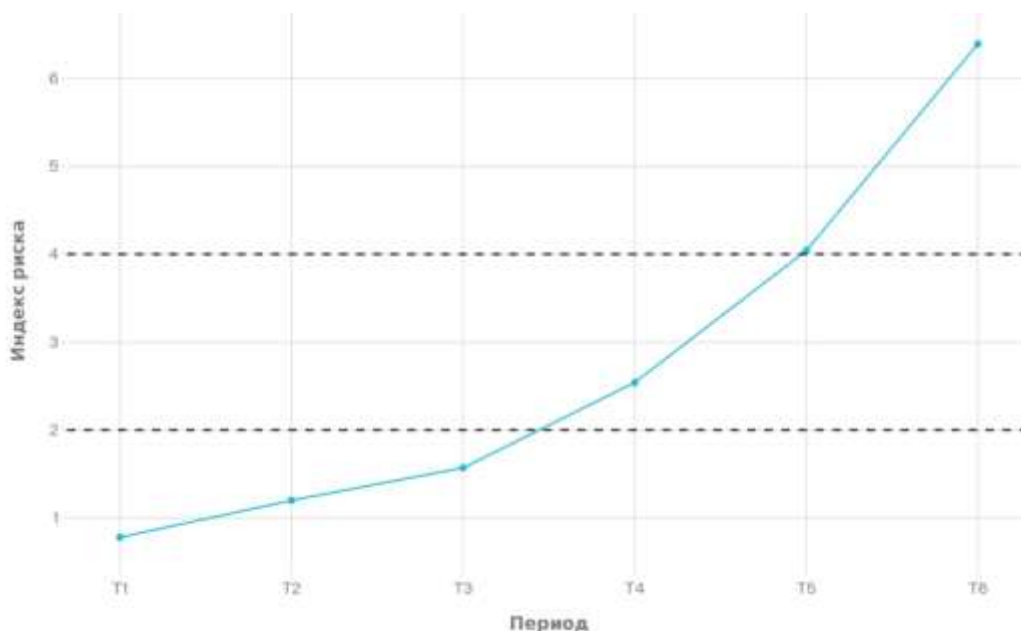


Рисунок 2- Индекс деформационного риска по циклам Т1-Т6

Динамика индекса деформационного риска демонстрирует пересечение порогов среднего и высокого риска между Т4 и Т5, что удобно для системы раннего предупреждения и регламентации действий диспетчерской службы и маркшейдерского контроля (рис.2).

Таблица 2

Сравнение методов мониторинга

Параметр	Наземное лазерное сканирование	Фотограмметрия	Совместное применение
Пространственная детализация	Высокая плотность облака точек и точная геометрия откосов.	Зависит от высоты полёта, камеры и схемы съёмки.	Позволяет объединить точную геометрию и текстурную информацию.
Скорость покрытия территории	Ограничена числом точек стояния и условиями видимости.	Высокая для протяжённых участков и отвалов.	Повышает оперативность и полноту наблюдений
Чувствительность к текстурным признакам	Ниже для визуальных дефектов, но хорошо фиксирует форму поверхности.	Высокая для трещин, выветривания и изменений текстуры.	Улучшает распознавание деформационных признаков.
Работа в режиме, близком к реальному времени	Возможна при стационарных системах или регулярных циклах съёмки.	Возможна при быстрых облётах БВС и автоматизированной обработке.	Наиболее перспективна для непрерывного геотехнического контроля.

Обсуждение

Материалы по мониторингу открытых горных выработок показывают, что наземное лазерное сканирование особенно эффективно в задачах точного геометрического контроля бортов, уступов и отвалов, тогда как фотограмметрия обеспечивает быстрое картирование крупных площадей и повышает информативность за счёт визуальных признаков состояния поверхности.[5-7]. Следовательно, их совместное использование даёт не просто дублирование измерений, а расширение аналитических возможностей системы мониторинга.

Автоматизированный анализ разновременных облаков точек позволяет выделять границы зон оседания, наклонов и потенциального оползневого процесса, а также использовать результаты для проверки математических моделей деформаций и уточнения опасных участков.[7-8]. Для практики это важно потому, что оперативный мониторинг должен не только фиксировать факт смещения, но и обеспечивать раннее предупреждение, когда величина деформации ещё не достигла аварийных значений, но скорость и пространственная локализация уже свидетельствуют о нарастании риска.

Ключевым ограничением остаётся качество привязки, совмещения и фильтрации облаков точек, поскольку ошибки регистрации могут интерпретироваться как ложные смещения.[6,8]. Поэтому интегрированная система контроля должна включать эталонные устойчивые зоны, регулярную калибровку, проверку на независимых реперах и пороговые критерии, учитывающие точность конкретного оборудования и условия объекта.

Выводы

Наземное лазерное сканирование и фотограмметрия являются взаимодополняющими технологиями мониторинга деформаций бортов карьеров и отвалов, обеспечивая как высокоточную геометрию поверхности, так и быстрое покрытие протяжённых участков наблюдений. На основе совместной обработки данных возможно рассчитывать смещения, скорости деформации и интегральный индекс риска, пригодный для раннего предупреждения об опасных изменениях состояния откосов. Иллюстративный расчёт показал, что переход от низкого к высокому риску может быть выявлен по совокупности роста максимального смещения и ускорения деформаций ещё до критического нарушения устойчивости, что делает интегрированный мониторинг эффективным инструментом геомеханического управления.

References

1. Арно В.В., Колесниченко Е.П., Гарифулина И.Ю., Миккельсен Е.А. Сканирующая тахеометрия в решении маркшейдерских задач при подземной отработке месторождения «Перевальное». Горная промышленность. 2025 № 3 С.40–44. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-40-44> EDN: MWJVKL
2. Курбатова В. В. Аппроксимация методики наземной лазерно-сканирующей тахеометрии к съемке подземных выработок // Вектор ГеоНаук. 2018. Т. 1. № 3. С. 40–52.
3. Курбатова В. В. Валидность сканирующей тахеометрии в решении комплекса маркшейдерских задач // Вектор ГеоНаук. 2018. Т. 1. № 1. С. 8–23.
4. Brown, A., Williams, C. Advances in Scanner Technology for Geological Surveys in Mining Operations. //Journal of Geospatial Engineering. 2020. Vol. 15(1). P. 32–45.
5. Использование технологии лазерного сканирования для наблюдения за состоянием устойчивости прибортовых массивов / Ф. К. Низаметдинов, Е. Н. Хмырова, О. Г. Бесимбаева, Н. Ф. Низаметдинов, Е. А. Олейникова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 2. – С. 156–160.
6. Исследование процесса деформирования прибортового массива качарского карьера на основе внедрения инновационных технологий / Е. Н. Хмырова, О. Г. Бесимбаева, Е. А. Олейникова, Е. А. Токкужин // Горные науки и технологии. – 2016. – № 4. – С. 10–20.
7. Решение горно-геометрических задач с использованием программ 3D-моделирования на месторождениях Казахстана / Е. Н. Хмырова, О. Г. Бесимбаева, Е. А. Олейникова, Н. А. Имранова, Р. В. Синяк // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 175–180.
8. Бесимбаева О. Г., Хмырова Е. Н., Бесимбаев Н. Г. Анализ точности инструментальных наблюдений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 5. – С. 15–18.

UDC 550.347

**Delitsyn L.L., Makeyeva L.I., Oreshin S.I., Tubanov T.A.,
Ochirova L.R. The structure of the upper mantle and mantle
transition zone of the eastern part of the Central Asian
fold belt based on seismic data**

Строение верхней мантии и переходной зоны мантии восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса по сейсмическим данным

Delitsyn Leonid Leonidovich

Doctor of technical sciences, Senior Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (IPE RAS)

Makeyeva Larissa Ivanovna,

PhD (candidate of physics and mathematics), Leading Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences

Oreshin Sergey Ivanovich,

PhD (candidate of physics and mathematics), Leading Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences

Tubanov Tsyren Alekseevich,

PhD (candidate of geology and mineralogy), Head of Laboratory. Dobretsov Geological Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (GIN SB RAS)

Ochirova Larissa Rinchinovna,

PhD (candidate of geology and mineralogy), Senior Researcher, Dobretsov Geological Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Делицын Леонид Леонидович,
доктор технических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Шмидта РАН

Макеева Лариса Ивановна,

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник,

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Орешин Сергей Иванович,

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник,

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Тубанов Цырен Алексеевич,

кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией,

Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ

Очирова Лариса Ринчиновна,

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник,

Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ

Abstract. The aim of the study is to investigate the structure of the upper mantle of the eastern part of the Central Asian fold belt (Transbaikalia, Eastern Mongolia, Amur Plate) based on seismic data. Latitudinal profiles of shear wave velocity down to a depth of 300 km are presented. In the mantle transition zone, the precursor of the P660S converted wave at the lower boundary of the transition zone is observed mostly in tectonically active areas.

Keywords: lithosphere, upper mantle, mantle transition zone, receiver functions, surface waves

***Аннотация.** Цель исследования – строение верхней мантии восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса (Забайкалье, Восточная Монголия, Амурская плита) по сейсмическим данным. Приведены широтные профили скорости поперечных волн до глубины 300 км. В переходной зоне мантии предвестник обменной волны P660S на нижней границе переходной зоны мантии наблюдается в основном в тектонически активных областях.*

***Ключевые слова:** литосфера, верхняя мантия, переходная зона мантии, приемные функции, поверхностные волны.*

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

Введение

Центрально-Азиатский орогенный пояс (ЦАСП), один из крупнейших аккреционных орогенов, состоит из большого числа террейнов, включающих докембрийские блоки (микроконтиненты), и островные дуги, расположенные между кратонами: Сибирским на севере, Таримским на юго-западе и Китайско-корейским на юго-востоке. На севере складчатые области восточной части ЦАСП (включая Енисейско-Забайкальский и Аргуно-Мамынский массив, западную часть Монголо-Охотского орогенного пояса) граничат с Сибирским кратоном по субширотным глубинным разломам. На востоке данного региона (восточная часть Монголо-Охотского пояса и др.) континентальные блоки разделены со структурами Тихоокеанского орогенного пояса по меридиональным разломам и разломам северо-восточного простирания, блоки на юге - по зонам широтного простирания с Северо-Китайским кратоном. Монголо-Охотский пояс, занимающий среднее положение среди орогенных поясов региона, имеет вид узкой прерывистой полосы от Центральной Монголии до Охотского моря (шириной не более 300 км и протяженностью до 3000 км) и фактически представляет собой шовную зону между древними континентальными блоками. В качестве основного механизма тектоно-магматической реактивации региона, рифтогенеза и вулканизма выдвигают: 1) конвергенцию Евразийской и Индийской плит, 2) влияние мантийных термальных плюмов, 3) субдукцию Тихоокеанской плиты на востоке и юго-востоке ЦАСП [1].

В данной работе представлены результаты изучения скоростей поперечных волн в верхней мантии до глубины 320 км в восточной части региона, включающем Забайкалье, Восточную Монголию и Амурскую плиту, по сейсмическим данным с помощью методики в которой используются приемные функции объемных волн, а также дисперсионные кривые фазовых и групповых скоростей основной гармонии Рэля [2,3]. Мы использовали данные сети станций ГИН СО РАН и БуФ ФИЦ ЕГС РАН [4], а также сейсмических станций изучаемого региона, доступных через международный центр данных IRIS DMC. С помощью указанных метода и данных мы исследуем вопрос

о наличии различий в строении литосферы и подлитосферной мантии к западу и востоку от предполагаемой западной границы Амурской плиты.

При изучении переходной зоны мантии, которая расположена на глубинах между 410 и 660 км, на сейсмических станциях, находящихся в пределах ЦАСП, ранее были выделены сейсмические импульсы, $P350s$ и $P600s$, свидетельствующие о возможном наличии зон пониженных скоростей над кровлей и над подошвой переходной зоны. Некоторые исследователи предполагают, что импульс $P600s$ имеет глобальный характер. В нашей работе подтверждается наличие сильного импульса $P600s$ в Забайкалье. Мы показываем также результаты измерений отношения амплитуды этой фазы к амплитуде волны $P660s$, образованной на подошве переходной зоны. Известно, что высокие значения этого отношения наблюдаются в регионах, связанных с современным рифтогенезом или недавней тектоно-магматической активностью, которую связывают с влиянием верхне-мантийных плюмов.

Строение верхней мантии восточной части Центрально-Азиатского пояса

Строение верхней мантии Центрально-Азиатского складчатого пояса восточнее $103^{\circ}E$ в диапазоне широт $40^{\circ}N - 56^{\circ}N$ детально изучалось рядом авторов при помощи таких геофизических методов как глубинное сейсмическое зондирование (ГСЗ), сейсмическая томография с использованием объемных и поверхностных волн, геотермия, гравиметрия, МТЗ и т.д. [2, 5-11]. Однако совместная инверсия приемных функций объемных волн Ps (PRF) и Sp (SRF) и дисперсионных кривых поверхностных волн для изучения этого региона ранее не применялась.

В наших предшествующих работах методами глобальной стохастической и локальной детерминированной инверсии приёмных функций было исследовано глубинное строение Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) [2,10] и Центральной Монголии (Хубсугул, Хангай, Гоби-Алтай) [3]. Здесь мы распространяем применение этих методов на часть Центрально-Азиатского складчатого пояса, лежащую восточнее $103^{\circ}E$.

При инверсии PRF и SRF скоростной разрез под станциями определяется при помощи минимизации функционала ошибки между наблюдаемыми и синтетическими суммами (стэками) приёмных функций [2]. При этом используется глобальная стохастическая оптимизация методом отжига (simulated annealing). Мы отобрали для обработки новые сейсмограммы, зарегистрированные станциями Улан-Удэ (UADB) и Хурамша (HRMR) по май 2024 года включительно, что значительно расширяет объем используемых данных по сравнению с более ранними исследованиями [2,11]. Общее число PRF для станции UADB составило 280, SRF — 67, для HRMR — 78 PRF и 17 SRF.

Рисунок 1 позволяет сравнить полученные этим методом модели скоростей поперечных волн V_s , под станциями Акташ (AKAR), HV19 и Улан-Удэ (UUDB).

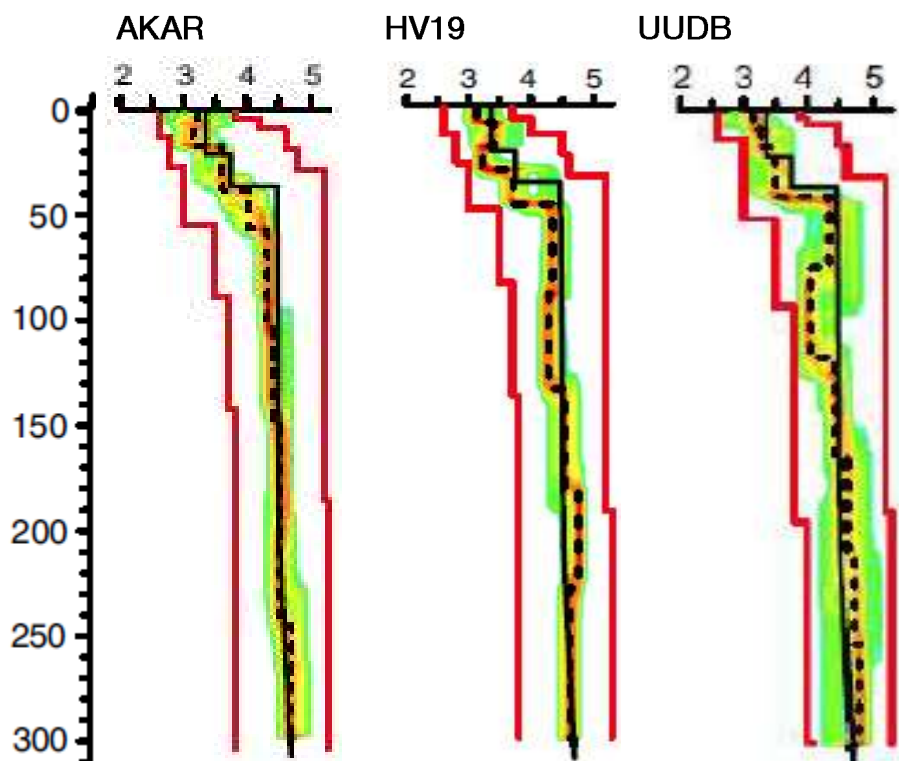


Рисунок 1. Скоростные разрезы, полученные совместным обращением PRF и SRF для станций AKAR, HV19, UUDB. Постериорное распределение V_s показано цветовым кодом. Медианы показаны пунктиром. Границы поиска показаны красными линиями, черными линиями — стандартная модель IASP91.

Под станцией AKAR на Алтае не наблюдается ни резкой границы между корой и мантией (Мохо), ни зоны пониженных скоростей в верхней мантии, которая позволила бы определить толщину литосферы. Строение мантии на глубинах от 100 до 300 км почти неотличимо от стандартной модели IASP91 [12].

Под станцией HV19, расположенной на севере Монголии в районе озера Хубсугул, граница Мохо выделяется отчётливо, а мощность коры составляет 48-50 км. Понижение скорости V_s , на глубинах 90-130 км позволяет оценить толщину литосферы под HV19 в 90 км. На глубинах 190-240 км скорость V_s , напротив, увеличена в сравнении со стандартной моделью IASP91, что в работе [3] было интерпретировано как деламинация (отслоение части литосферы) в этом регионе.

Под станцией UUDB границы между корой и мантией, и литосферой и астеносферой (LAB) выражены наиболее резко. Мощность коры здесь составляет 39

км, а литосферы — 73 км. Слой пониженных скоростей V_s находится на глубинах между 73 и 116 км, а относительное снижение на его кровле составляет -7%. В более ранней работе [2] использовалось меньше данных, оценка толщины коры имеет близкую величину – 40 км, а литосферы – 85 км. Для станции HRMR мы не обнаруживаем существенных различий по сравнению с UUDV.

Описанные различия в строении коры и мантии между станциями, расположенными на Алтае, в северной Монголии и в западном Забайкалье согласуются с тем, что основным фактором геодинамики в западной части ЦАСП является коллизия Индийской и Евразийской плит, в то время как в восточной части определяющую роль может играть переходная зона верхней мантии. В результате стагнации океанских плит (слэбов) в переходной зоне, над ней происходит подъем флюидов, которые понижают вязкость астеносферы, а также и скорость сейсмических волн в ней [1,9,10].

На широтных профилях 52°N, 50°N, 48°N (рис.2) иллюстрируются сильные изменения в расположении астеносферы в диапазоне между 100°E и 150°E. Здесь при помощи цвета изображены абсолютные скорости V_s , точками — землетрясения с магнитудой выше 5.0.

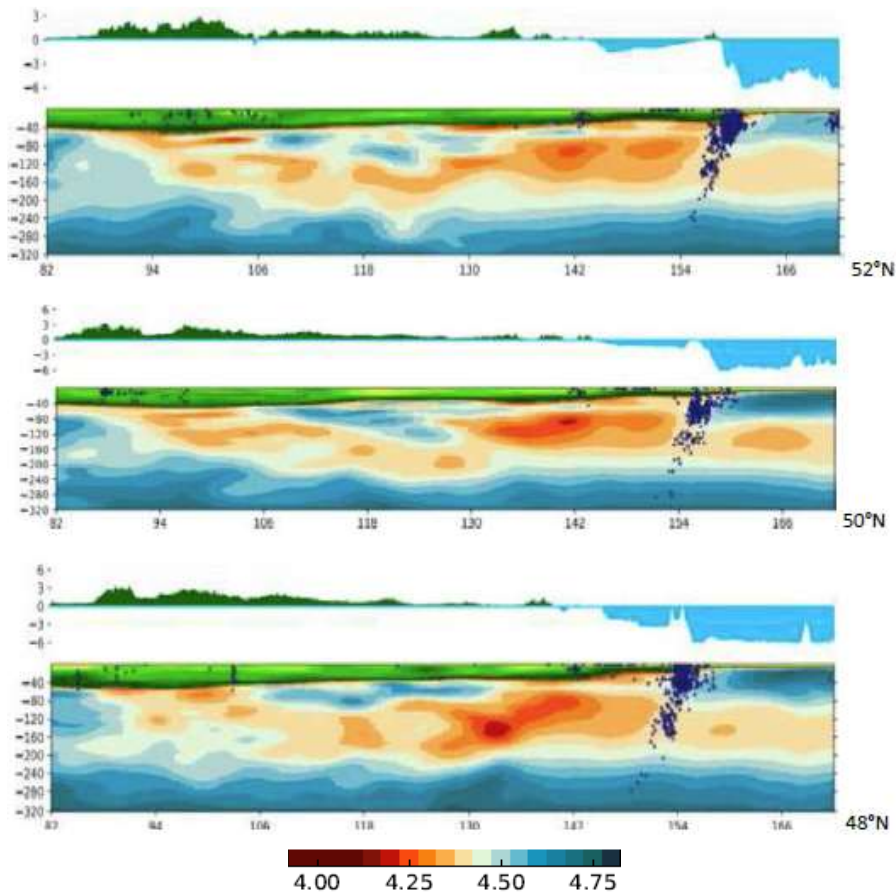


Рисунок 2. Широтные скоростные профили поперечных сейсмических волн.

Скоростные разрезы для этих профилей были получены методом локальной детерминированной оптимизации, детально описанным в работе [3]. Этот метод, в отличие от использованного выше, требует существенно меньше вычислительных затрат для многопараметрических задач, что позволяет изучить строение под значительно большим числом станций. В частности, здесь мы использовали данные всех сейсмических станций изучаемого региона по 2021 год включительно, доступных через международный центр данных IRIS DMC. Следует отметить, что локальная оптимизация чувствительна к начальному приближению и не гарантирует нахождение глобального минимума нелинейного функционала ошибки. Чтобы избежать локальных минимумов, представляющих нереалистичные решения, мы используем дополнительные данные в виде дисперсионных кривых фазовых и групповых скоростей основной гармонике Рэлея в диапазоне 25 с - 250 с. Кроме того, при здесь мы используем не простые суммы приёмных функций, а так называемые стэки. При расчёте стеков, отдельные приёмные функции сдвигаются на время, соответствующее теоретической задержке обменной волны, и только затем суммируются. В качестве примера, на рис. 3а представлены стэки PRF для станций UUDB и HRMR, рассчитанные для глубин обмена от 0 до 800 км с шагом 100 км.

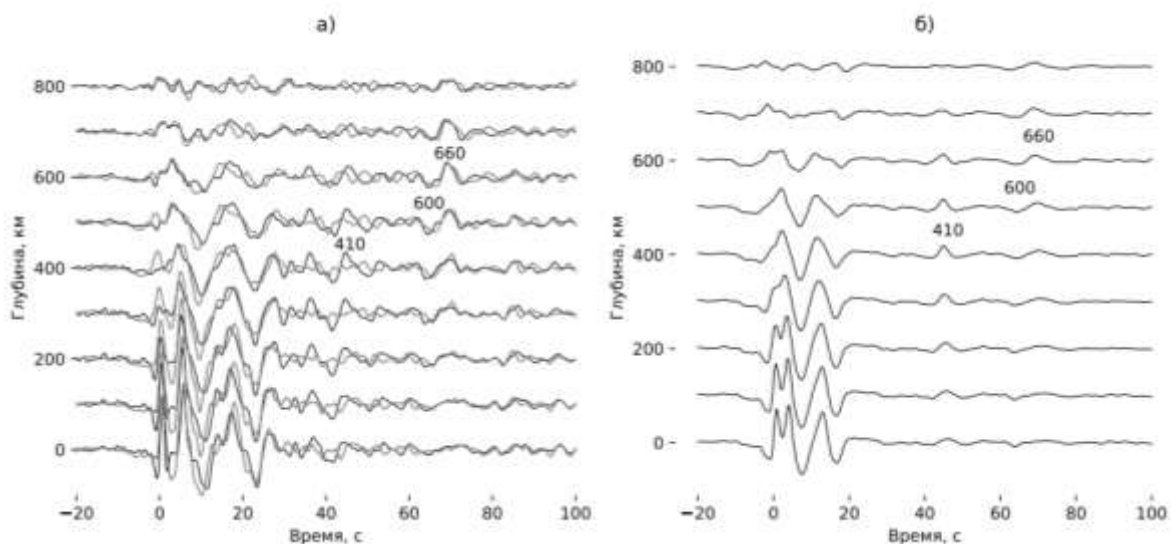


Рисунок 3. а) Стэки приёмных функций волн P_s для станций UUD (чёрная линия) и HRMR(серая линия); б) Аналогичные стэки для станций сети YP, расположенных восточнее 125°E . Границы переходной зоны на глубинах 410 и 660 км и граница на глубине 600 км подписаны над соответствующими фазами.

Распределение скоростей поперечных волн V_s в регионе ЦАСП между 82°E и 170°E для широт 48°N - 52°N характеризуется существенной латеральной неоднородностью (рис. 2).

Относительно высокие скорости в литосфере и под ней между 82°E и 94°E отвечают горным сооружениям Алтая, что согласуется со строением под станцией Акташ (50.3°N , 87.6°E). Литосферный блок между 94°E и 105°E в районе Восточных Саян и Байкальской рифтовой области характеризуется расслоенностью. Под литосферным “kozyрьком”, мощность которого меняется от 65 км до 90 км прослеживаются как отрицательные, так и положительные аномалии скоростей V_s , сложной формы и переменной мощности. Наибольшее внимание исследователей ранее привлекал наиболее неглубокий из них, кровля которого поднимается до 65 км [3, 13, 14].

Восточнее 105°E такой слой больше не наблюдается. Здесь верхняя часть литосферы имеет нормальные и высокие скорости 4.5 - 4.6 км/с, и понижения скоростей не наблюдается вплоть до глубины 73 км. Мы полагаем, что эту область следует отнести к относительно более “жесткой” и менее деформируемой Амурской микроплите, которая, хотя и неоднородна, но движется как единое целое в юго-восточном направлении, в то время как характер деформаций Центральной Монголии — более сложный [15].

Обращает на себя внимание узкая полоса повышенной сейсмичности на профилях 48° - 50°N вблизи 103° - 104°E , к востоку от которой находится Хэнтэйское поднятие (вблизи этой зоны произошло Могодское землетрясение 1967 г.).

Различие в строении верхней мантии западной и восточной частей Центрально-Азиатского складчатого пояса было обнаружено в работе [8] и других работах, послуживших основой для введения границы между Западной (Центрально-Азиатской) и Восточно-Азиатской частями ЦАСП по субмеридиональному георазделу 102° — 104°E [16].

Между 116°E и 124°E высокие скорости в литосфере прослеживаются до глубин около 160 км, в районе расположения Аргунского массива (Аргуно-Мамынского орогенного пояса [7]). Ранее область мощной литосферы близкого положения и формы была выделена в работах [7, 17] по гравитационным и сейсмическим данным. Восточнее, в районе северной окраины бассейна Сунляо, толщина высокоскоростного литосферного слоя уменьшается.

Протяжённая низкоскоростная аномалия на глубинах 80-160 км между хребтом Сихотэ-Алинь (138°E) и Камчаткой (158°E), по-видимому, характеризует астеносферу, вязкость которой значительно понизилась под воздействием флюидов, поднимающихся

из переходной зоны или области над ней в результате субдукции Тихоокеанской плиты [10, 18, 19].

В целом рис. 2 подтверждает обоснованность проведения границы Амурской плиты восточнее области Центральной Монголии вблизи 105°E . В дополнение к повышенной сейсмичности в этом районе и изменению векторов скорости смещения земной поверхности [15] скоростная структура литосферы и подлитосферной мантии к западу и востоку от этой границы значительно отличаются. Мы предполагаем, что литосфера Хангайского поднятия на западе, разрушается в процессе деламинации, в то время как литосфера Амурской плиты, объединившая менее мощные террейны, движется как единое целое в юго-восточном направлении. Обширная отрицательная аномалия глубинах 80-160 км между хребтом 138°E и 158°E объясняется понижением вязкости и скорости V_s в астеносфере, которая локально воздействует на литосферу вплоть до Хангая на западе. Ещё западнее, в районе Алтая не наблюдается даже локальное воздействие.

Переходная зона мантии

Особенность изучаемого региона – наличие на стэках PRF сильных импульсов, предшествующих обменным волнам P_{410s} и P_{660s} в центральной и восточной частях Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) [10]. Эти импульсы обладают обратной полярностью по отношению к P_{410s} и P_{660s} . В то время как волны P_{410s} и P_{660s} выделяются практически повсеместно и объясняются фазовыми переходами на верхней и нижней границах переходной зоны, вопрос о глобальном характере и природе их предвестников с противоположной полярностью остаётся предметом дискуссии.

Источником первого импульса, который на 35-40 секунд запаздывает по отношению к P -волне, считается слой с повышенным содержанием воды на глубине 350-400 км, при этом допускается частичное плавление мантии [10]. Второй импульс запаздывает на 65 секунд по отношению к волне P и опережает на 5 секунда волну P_{660s} [10, 18, 19]. На рис. 3 мы обозначаем этот импульс P_{600s} .

Авторы работы [20] предположили, что источником P_{600s} является слой пониженной на 2.2% скорости, расположенный на глубинах 570-600 км и состоящий из гранатита в соответствии с гипотезой А. Рингвуда [21]. В работе [22] проведено исследование распространения аналогичного импульса в Китае, где он был хорошо выражен только на станциях восточной части страны. В работе [23] на основе суммирования данных станций на континентах и океанических островах был сделан вывод, о том, что слой пониженной скорости на глубине 600 км распространён повсеместно. Однако в работах [3, 10] было продемонстрировано, что импульс P_{600s} не

выделяется на Сибирской платформе и в Западной и Центральной Монголии, хотя отчётливо виден на станциях восточной части Байкальской рифтовой зоны.

В работе [10] было показано, что импульс $P600s$ обладает значительной амплитудой на стэках, полученных по данным станции UUDB. На рис. 3 сплошными черными линиями показаны стэки, рассчитанные по данным станции UUDB за значительно более длинный период времени (до мая 2022 года), так что общее число просуммированных PRF составило 657. Сплошными линиями серого цвета показаны стэки для станции HRMR, полученные путём суммирования 446 PRF. Стэки для UUDB и HRMR близки в промежутке времени 20-30 сек после прихода P -волны, где велики амплитуды волнам, преломленных в коре и на границе коры и мантии, их многократных отражений.

Импульсы $P660s$ на рис. 3а хорошо видны как на станции UUDB, так и на станции HRMR. На обеих станциях им предшествуют импульсы $P600s$ с отрицательной полярностью, при этом после $P660s$ импульсов сравнимой амплитуды не наблюдается.

Рис. 3б представляет стэк для 5495 PRF, рассчитанных для всех станций сети YP, расположенных восточнее $125^{\circ}E$. Различия по сравнению с рис. 3а наблюдаются на всём временном отрезке. Отличия на временах до 30 секунд объясняются существенным утонением земной коры на востоке. Хотя импульс $P660s$ на рис. 3б отчётливо выделяется на фоне шума, его амплитуда очень мала и не превышает амплитуды предшествующего негативного импульса $P600s$. Отметим, что рис. 3а и 3б одинаково нормированы к амплитуде падающей P -волны, что позволяет визуально сравнивать амплитуды импульсов.

Далее мы предпринимаем попытку уточнить природу импульса $P600s$ при помощи изучения отношения его амплитуды к амплитуде $P660s$, которое показано по вертикальной оси на рис. 4. Использовались только данные станций, для которых мы отобрали не менее 50 PRF. На стационарных станциях ФИЦ ЕГС РАН и монгольской станции Улан-Батор мы располагаем многими сотнями PRF, поэтому для них были сделаны случайные повторные выборки по 300 записей, и каждая выборка изображена точкой. Для других сетей каждой станции соответствует одна точка.

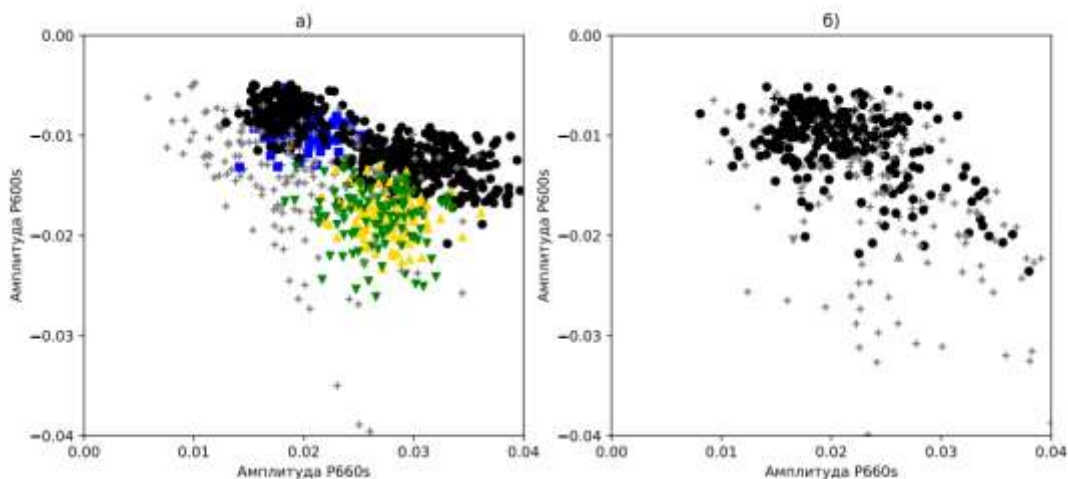


Рисунок 4. Отношение амплитуд $P600s$ и $P660s$ к волне P: а) для станций России и Монголии. Чёрные кружки - станции на щитах и платформах, жёлтые и зелёные треугольники - станции Улан-Удэ и Хурамша соответственно, синие квадраты - станция Улан-Батор, серые плюсы - другие станции в Монголии и Китае (сети XI, XL, YP, ZX), станции вне щитов и платформ; б) для станций крупнейших стационарных сетей Северной и Южной Америки и Австралии (сети AU, BL, BR, CN, LD, N4, NM, S1).

Рис. 4 мы интерпретируем как наложение двух распределений. Первое распределение (чёрные кружки) демонстрирует прямую пропорциональность амплитуды $P600s$ амплитуде $P660s$ на щитах и платформах. При этом амплитуда $P600s$ составляет приблизительно 0.4 от амплитуды $P660s$, вне зависимости от их абсолютных величин. Такое поведение характерно для левого «лепестка» сейсмического импульса, представляющего волну $P660s$ и позволяет предположить, что на щитах и платформах граница 600 км отсутствует.

В то же время в других тектонических условиях не обнаруживается зависимости $P600s$ от $P660s$. В таких обстановках возможно существование самостоятельной границы раздела в переходной зоне, порождающей импульс $P600s$. Достоверный ответ на вопрос о природе импульса $P600s$, на наш взгляд, может дать лишь моделирование скоростного строения среды для разных тектонических обстановок, в диапазоне глубин от земной поверхности до подошвы переходной зоны.

Вместе с тем, определённые выводы о природе $P600s$ позволяет сделать сопоставление географического распределения отношения амплитуды $P600s$ к амплитуде $P660s$, со скоростным строением литосферы и данными о магматической активности (рис. 5).

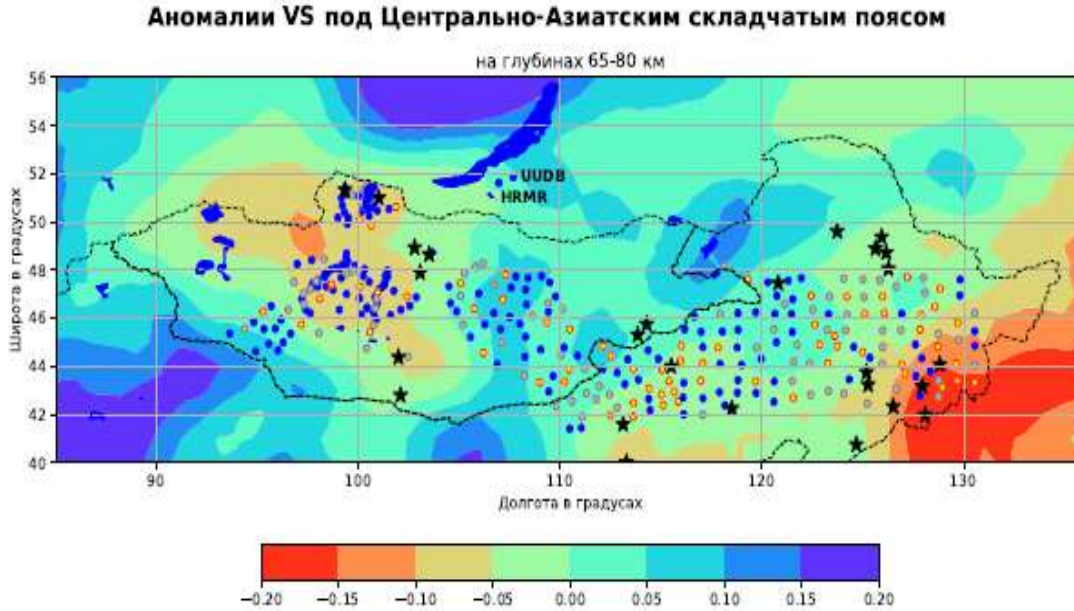


Рисунок 5. Аномалии скоростей поперечных волн V_s , осреднённые в диапазоне глубин 60-85 км. Величины аномалий приведены на шкале справа. Кружками изображено отношение амплитуд $P600s/P660s$ (см. пояснение в тексте). Черными звёздочками отмечены районы кайнозойского вулканизма.

На рис. 5 использованы три градации отношения амплитуд импульсов $P600s$ к $P660s$. Измерения на станциях, где это отношение выше $-0,75$ показаны кружками синего цвета, для отношения в диапазоне от $-0,75$ до $-1,0$ — серыми, а в случае, когда $P600s$ превосходит по абсолютной величине $P660s$ — жёлтыми кружками.

В качестве фона используются отклонения скорости поперечных волн V_s от среднего значения, осредненные по глубинам 65 км — 85 км. Звездочками изображены районы кайнозойской вулканической активности.

Как показывает рис. 5, в районах относительно пониженных скоростей в верхней части литосферы, соответствующих плато Дариганга и периферии бассейна Сунляо отношение $P600s/P660s$ наиболее велико по абсолютной величине. Исходя из разрезов на рис. 2 и стэков на рис. 3б мы полагаем, что роль коровых и литосферных ревербераций на временах запаздывания 58 с - 60 с незначительна, и причиной высокого отрицательного отношения $P600s/P660s$, являются аномалии переходной зоны.

Для тех регионов, где амплитуда $P660s$ велика, представляется вероятным наличие слоя пониженных скоростей с кровлей 570 км или глубже [3,10]. Для регионов, где амплитуда 660 км меньше, возможны альтернативные объяснения, такие как градиентный характер самой границы 660 км, либо наличие в переходной зоне слоя не

низких, а высоких скоростей (например, стагнирующей плиты), благодаря чему скоростной контраст на глубине 660 км оказывается ниже стандартного и порождает слабый импульс $P660s$.

Заключение

Установлены некоторые особенности скоростного строения литосферы и астеносферы для Забайкалья и Восточной Монголии, включающей разные тектонические области (Байкальская рифтовая зона, Восточно-Монгольская вулканическая зона, Амурская плита).

Наблюдаются значительные различия в строении верхней мантии - к западу и востоку от меридиана 105° в.д. Низкоскоростная линза с кровлей, поднимающейся до 65 км в районе Хангайского поднятия, не прослеживается восточнее меридиана $105^\circ E$. При этом более глубокая отрицательная аномалия V_s увеличивается в восточном направлении.

Внутри Амурской плиты отчётливо выделяется высокоскоростная литосфера Аргунского (Керулен-Аргуно-Мамынского) массива, которая на юге граничит с более тонкой литосферой бассейна Сунляо.

Сложное строение литосферы региона является отражением геодинамических изменений структуры Центрально-Азиатского складчатого пояса, связанных с процессами субдукции, даламинации и действия восходящих верхнемантийных плюмов в этом регионе.

Исследование регионального распределения амплитуд фаз $P600s$ и $P660s$ для восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса и прилегающих регионов приводит к выводу, что фаза $P600s$ наблюдается не повсеместно, а в регионах недавней тектонической активности.

Работа выполнена в рамках проведения исследований по госзаданию ИФЗ РАН № FMWU-2025-0030 и госзаданию ГИН СО РАН № 126020216348-5 с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

References

1. Zorin Yu.A., Turutanov E.Kh., Kozhevnikov V.M., Rasskazov S.V., Ivanov A.I. The nature of cenozoic upper mantle plumes in East Siberia (Russia) and Central Mongolia // *Geology&Geophysics*- 2006. - V. 347(10). - P. 1060-1074.

2. Vinnik L.P., Oreshin S.I., Tsydypova L.R., Mordvinova V.V., Kobelev M.M., Khritova M.A., Tubanov Ts.A. Crust and mantle of the Baikal rift zone from P- and S-wave receiver functions // *Geodynamics & Tectonophysics*. - 2017. - V. 8(4). - P. 695-709.
3. Vinnik L.P., Delitsyn L.L., Makeyeva L.I., Oreshin S.I. Deep structure of the Baikal rift zone and Central Mongolia // *Physics of the Solid Earth*.- 2024(2). - P. 3-13.
4. Tubanov Ts.A., Predein P.A., Tcydypova L.R., Sanzhieva D.P.-D., Radzimonovich N.A., Bazarov A.D. Results and prospects of seismological observations in the central part of the Baikal rift // *Russian Journal of Seismology*. - 2021. - V. 3(4). - P. 38-57.
5. Zorin Yu.A., Balk T.V., Novoselova M.R., Turutanov Ye.K. The thickness of the lithosphere beneath the Mongolian-Siberian mountainous region and adjacent territories // *Physics of the Solid Earth*. - 1988(7). - P. 33-42.
6. Koulakov I.Yu. Upper mantle structure beneath Southern Siberia and Mongolia based on regional seismic tomography data // *Geology and Geophysics*. - 2008. - V. 49(3). - P.248-261.
7. Didenko A.N., Kaplun V.B., Malyshev Yu.F., Shevchenko B.F. The structure of the lithosphere and mesozoic geodynamics of the eastern Central Asian fold belt // *Geology and Geophysics*. - 2010. - V. 51(5) - P. 629-647.
8. Yanovskaya T.B., Kozhevnikov V.M. 3D S-wave velocity pattern in the upper mantle beneath the continent of Asia from Rayleigh wave data // *PEPI*. - 2003. - V.138. - P.263 - 278.
9. He J., Xu M., Wu Q., Zhang F. Hydrous melting driven upwelling from the mantle transition zone in the Mongolia Plateau revealed by receiver function analysis // *JGR: Solid Earth*. 2022. V.127(11). DOI: 10.1029/2022JB024905.
10. Vinnik L.P., Oreshin S.I., Makeyeva L.I., Mordvinova V.V., Tsydypova L.P. Mantle structure and processes in transition zone of the Baikal rift zone // *Physics of the Solid Earth*. - 2022(6). - P. 3-11.
11. Mordvinova V.V., Kobelev M.M., Khritova M.A., Kobeleva E.A., Trinkova D.S. Deep structure of southern margin of the Siberian craton and its folded environment on volume waves of far earthquakes // *InterExpo-Geo-Sibir*. - 2017. - V. 4(1). - P. 37 - 41.
12. Kennett B.L.N., Engdahl E.R. Travel times for global earthquake location and phase identification // *Geophys. J. Int.* - 1991. - V.105(2). - P. 429-465.
13. Mordvinova V.V., Sankov V.A., Artem'ev A.A., Deschamps A., Dugarmaa T., Ulziibat M., Deverchère J., Perrot J. Velocity structure of the lithosphere on the 2003 Mongolian - Baikal transect from SV waves // *Physics of the Solid Earth*. - 2007. - No. 2. - P.11-22.
14. Xu M., Wang K., Chen J., He J. Multilevel mechanisms driving intraplate volcanism in Central Mongolia revealed by adjoint waveform tomography of receiver function and

ambient noise data // Earth and Planetary Science Letters. – 2024. – V.650. DOI:10.1016/j.epsl.2024.119137.

15. Ashurkov S.V., San'kov V.A., Serov M.A., Luk'yanov P.Yu., Grib N.N., Bordonskii G.S., Dembelov M.G. Recent deformations of the Amurian plate and surrounding structure (data from GPS measurements) // Geology & Geophysics. – 2016. – V. 57(11). – P. 2059-2070.

16. Gatinsky Yu.A., Prokhorova T.V., Rundquist D.V. Central Asian geodynamic regimes west and east 102-104° Geodivider // Geodynamics & Tectonophysics. – 2020. V. 11(2). P. 334-351.

17. Malyshev Yu.A., Podgorny V.Ya., Shevchenko B.F., Romanovsky N.P., Kaplun V.B., Gornov P.Yu. Deep structure of the bounding zone structures of the Amur lithospheric plate // Pacific Geology. – 2007. – V.26(2). – P. 3-17.

18. Yang J., Faccenda M. Intraplate volcanism originating from upwelling hydrous mantle transition zone // Nature. – 2020. – V. 579. – P. 88–91.

19. He J., Wu Q. Mantle transition zone structure beneath the Central Asian Orogenic Belt // Earth Sciences. – 2020. V.63(4). – P. 548-560.

20. Shen Y., Blum J. Seismic evidence for accumulated oceanic crust above the 660-km discontinuity beneath southern Africa // Geophys. Res.Lett. – 2003. -V. 30(18). DOI:10.1029/2003GL017991.

21. Ringwood A.E. Phase transformations and their bearing on the constitution and dynamics of the mantle // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1991. – V. 55(8). – P. 2083—2110.

22. Shen X., Zhou T., Kawakatsu H. Mapping the upper mantle discontinuities beneath China with teleseismic receiver functions // Earth Planets Space. – 2008. – V. 60. – P.713-719.

23. Shen X., Yuan X., Li X.Q. A ubiquitous low-velocity layer at the base of the mantle transition zone // Geophysical Research Letters. – 2014. V. 41(3). – P. 836-842.

UDC 550.311

Gavrilov S.V. Semiempiric estimate of locations of prospective oil- and gas-bearing and metallogenic zones in the Northern Caucasus

Gavrilov Sergei Vladilenovich,

Doctor of physical and mathematical sciences, Main scientist of the laboratory 102,
Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences

Abstract. Assuming mantle oil- and gas-bearing rocks and metallogenic solutions being transported from the mantle wedge to the Earth's surface by the local upwelling convective flows prospective oil- and gas-bearing and metallogenic zones in the Northern Caucasus are estimated to be localized at certain 'hot spots' opposite to the main presently extinct volcanoes, these 'hot spots' being shifted by $\sim(1-2)\times 10^2$ km northward off the Great Caucasus ridge. Semi-empiric formula for the modeled separation between a Caucasus summit, like Elbrus, and corresponding opposite 'hot spot', like that at Pyatigorsk, is derived on the basis of analytical solution of the linear mantle convective instability problem in the mantle wedge previously investigated by the authors taking account of the averaged temperature and pressure dependence of viscosity. The observed Elbrus – Pyatigorsk distance coincides with the model one within the accuracy of $\sim 20\%$, thus the formula for the volcano-hot spot separation derived here can be used for prospecting new oil- and gas-bearing and metallogenic zones opposing extinct or active volcanoes of island or continental margins volcanic chains. Calculation of convective perturbations growth rates in the Caucasia mantle wedge allows concluding the subduction velocity to previously (prior to ~ 10 Myr) be equal to ~ 70 mm a year, to subsequently be reduced to less than ~ 60 mm a year, which reduction was the probable cause for the volcanoes extinction. Adequacy of the model proposed here to observations serves the Caucasian rheological mantle wedge parameters (activation energy ~ 240 kJ \times mol $^{-1}$, mean viscosity $\sim 2 \times 10^{20}$ Pa \cdot s) to be close to realistic.

Keywords: dissipative heating in the mantle wedge, conductive heat and mass transfer, angle and velocity of subduction, oil- and gas-bearing and metallogenic zones.

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

Введение

В тылу зон субдукции позади передовой дуги и вулканической цепи, параллельных желобу, наблюдаются 2D зоны окраинного раздвигания или растяжения литосферы, характеризующиеся повышенным тепловым потоком на дневной поверхности [1, рис. 4.57]; [2]. В зонах окраинного раздвигания образуются окраинные бассейны или грабены [3]. С зонами повышенного теплового потока, как правило, связаны нефтегазоносные (и, возможно, металлоносные) зоны [4]. Субдуцирующие блоки экранируют тепловой поток из нижележащей мантии, в силу чего термические и конвективные аномалии формируются в мантийном клине за счет диссипативного тепловыделения в вязком течении, вызываемом в астеносфере поддвигающейся плитой. На меньших расстояниях от «острия» мантийного клина встречные движения вещества в астеносфере сближены, скорости деформации и диссипативное тепловыделение выше, а на больших расстояниях последнее падает. Конвективный же механизм выноса диссипативного тепла более эффективен на больших расстояниях от желоба, где

мощность слоя, охваченного конвекцией больше, и больше локальное число Рэлея. В силу этого конвективный вынос тепла восходящими конвективными течениями (в виде продольных валов переменной толщины и поперечных к субдукции вихрях Карига) максимальны на некоторых определенных расстояниях от желоба. При этом, с учетом зависимости вязкости от температуры и давления, расстояние от желоба до зоны максимального 2D выноса диссипативного тепла превышает расстояние от желоба до 3D зоны максимального выноса диссипативного тепла, в которой (3D зоне) формируется вулканическая цепь. Можно ожидать, что 3D конвекция «модулирует» 2D конвективный вихрь Карига таким образом, что против каждой вулканической постройки в тылу зоны субдукции формируется «горячая точка», в которой локализуется вынос мантийных углеводородов и металлоносных растворов из мантийного клина.

Описание аналитической модели

Простая термомеханическая модель мантийного клина между подошвой литосферы у континентальной окраины и субдуцирующей плитой, поддвигающейся под континентальную плиту под углом β со скоростью V , может быть построена как модель вязкого течения, вынужденного движением субдуцирующей плиты. Считая материал мантийного клина однородной несжимаемой жидкостью с постоянным коэффициентом вязкости η , движение вещества в мантийном клине определяется формулами в [5], согласно которым компоненты скорости U (горизонтальной) и W (вертикальной) равны (ψ – функция тока, x – горизонтальная, z – вертикальная координаты):

$$\begin{aligned}U &= V_x = -\partial\psi/\partial z = -D\arctg(x/z) + (Cx + Dz)x/(x^2 + z^2) - B, \\W &= V_z = \partial\psi/\partial x = C\arctg(x/z) + (Cx + Dz)z/(x^2 + z^2) + A,\end{aligned}\quad (1)$$

где при условиях прилипания (непроскальзывания) на верхней границе субдуцирующего блока и подошве настилающей континентальной литосферы (ось z направлена вниз):

$$\begin{aligned}A &= V((\pi/2)\beta\sin\beta)/(\beta^2 - \sin^2\beta), \quad B = V((\pi/2 - \beta)\sin\beta - (\pi/2)\beta\cos\beta)/(\beta^2 - \sin^2\beta), \\C &= -V(\beta\sin\beta)/(\beta^2 - \sin^2\beta), \quad D = V(\beta\cos\beta - \sin\beta)/(\beta^2 - \sin^2\beta),\end{aligned}\quad (2)$$

В [6] показано, что термическая и конвективная неустойчивости, возникающие в мантийном клине благодаря диссипативному тепловыделению, определяются в линейном приближении инкрементами γ_{\perp} и γ_{\parallel} , зависящими от горизонтального расстояния x , отсчитываемого от «ребра» мантийного клина в направлении субдукции и волновыми числами k_x и k_y , определяющими пространственные горизонтальные периоды $2\pi/k_x$ и $2\pi/k_y$ в направлениях вдоль и поперек субдукции (ось u перпендикулярна субдукции, $t = tg\beta$, $\lambda = \pi/t$):

$$\gamma_{\perp}=\gamma_{\perp}(k_y=0)=4\eta\xi D^2/(\rho c_p T x^2)+\alpha\rho g x^3 T k_x^2/(\eta(x^2 k_x^2+\lambda^2)^2)+ \\ +16\eta\xi U' k_x^2 \lambda^2 D/\rho c_p T(x^2 k_x^2+\lambda^2)^2 - (x^2 k_x^2+\lambda^2)\chi/x^2, \quad (3)$$

$$\gamma_{\parallel}=\gamma_{\parallel}(k_x=0)=4\eta\xi D^2/(\rho c_p T x^2)+\alpha\rho g x^3 T k_y^2/(\eta(x^2 k_y^2+\lambda^2)^2)+ \\ +4\eta\xi U' k_y^2 D/\rho c_p T(x^2 k_y^2+\lambda^2)- (x^2 k_y^2+\lambda^2)\chi/x^2, \quad (4)$$

Инкремент $\gamma_{\parallel}(k_x=0)$ описывает нарастание во времени продольных конвективных валов переменной толщины горизонтального размера $2\pi/k_y$, ориентированных вдоль субдукции, а инкремент $\gamma_{\perp}=\gamma_{\perp}(k_y=0)$ соответствует поперечным валам (вихрям Карига) горизонтального размера $2\pi/k_x$. Горизонтальное расстояние $x=x_1$, соответствующее максимуму инкремента $\gamma_{\parallel}(k_x=0)$, как функции x , определяет положение вулканической цепи, а максимум $\gamma_{\perp}=\gamma_{\perp}(k_y=0)$ при некотором $x=x_2$ соответствует локализации поперечного восходящего конвективного потока, налагающегося на конвективную систему в виде продольных валов и определяющего положение «горячих точек», формирующихся в тылу зон субдукции. Мощность диссипативного тепловыделения в мантийном клине

$$\frac{1}{2} \times \tau_{ik}^2/\eta=4\eta(Cz-Dx)^2/(x^2+z^2)^2 \quad (5)$$

при $\beta < \pi/4$ и C и D (2) максимальна у нижней границы мантийного клина, где также максимальна температура в вертикальном сечении мантийного клина. В (3), (4) $\chi=1 \text{ мм}^2 \times \text{с}^{-1}$ – коэффициент температуропроводности, $\rho = 3.3 \times 10^3 \text{ кг} \times \text{м}^{-3}$ – плотность, g – ускорение силы тяжести, $c_p = 1.2 \text{ Дж} \times \text{кг}^{-1} \times \text{К}^{-1}$ – удельная теплоемкость при постоянном давлении, $\alpha = 3 \times 10^{-5} \text{ К}^{-1}$ – коэффициент теплового расширения. Температура на границах мантийного клина принимается равной температуре $T_m = 1500 \text{ К}$ субсолидуса, а температура внутри мантийного клина получается решением уравнения теплопроводности с учетом молекулярного и адвективного переноса тепла, причем максимум температуры в вертикальном сечении мантийного клина находится у поверхности субдуцирующего блока

$$T_{\max} = T_m + \eta \times V^2 \times (\rho c_p \chi)^{-1} \times (F + GVx/\chi)^{-1} \quad (6)$$

где $\kappa = 4 \text{ Дж} \times \text{м}^{-1} \times \text{с}^{-1} \times \text{К}^{-1}$ – коэффициент теплопроводности, $\chi = \kappa/\rho c_p = 1 \text{ мм}^2/\text{с}$, а

F и G – безразмерные функции угла субдукции β , которые при $\pi/6 < \beta < \pi/4$ могут быть представленными приближенными интерполяционными формулами, вытекающими из численного решения:

$$F = -2.70 + 15.75 \times \beta, \quad G = -2.35 \times 10^{-3} + 1.27 \times 10^{-2} \times \beta. \quad (7)$$

В (3),(4) $T = T_m + T_{\max}/2$ – температура, средняя по вертикальному сечению мантийного клина, $T' = (T_{\max} - T_m)/(tg\beta)$, $U' = (D(\sin\beta \cos\beta + \beta) - C \sin^2\beta)/tg\beta$. Например, при $\eta = 10^{21} \text{ Па} \cdot \text{с} = 10^{22} \text{ П}$, $\beta = \pi/6$, $V = 100 \text{ мм/год}$, $x = 100 \text{ км}$ согласно (6)–(7) величина $T_{\max} - T_m \sim 400 \text{ К}$. В (3), (4)

коэффициент вязкости считается равным $\eta = \eta_0 \times \exp \xi$, где

$$\xi = (E^* + pV) / RT \quad (8)$$

(E^* и V – энергия и объем активации, p – давление, R – универсальная газовая постоянная), и считается равным среднему значению, т.е. зависимость вязкости от температуры и давления учитывается усредненным образом. При энергии активации $E^* = 240$ кДж/моль и активационном объеме $V = 8 \times 10^3$ мм³/моль, характерных для «влажного» оливина в мантийном клине [7], получаем $\xi \sim 20$.

Вычисление $\gamma_{||} = \gamma_{||}(k_x = 0)$ по формуле (4) при различных углах и скорости субдукции β и V показывает, что с точностью $\sim 10^{-2}$ максимум $\gamma_{||}$ располагается на расстоянии $x_1 \sim 2\pi/k_y$ от «острия» мантийного клина. Это расстояние практически точно совпадает с пространственным периодом расположения вулканов (или групп вулканов) на вулканической цепи в зонах субдукции. Из (3), (4) следует, что при $\xi = 0$, т.е. при отсутствии зависимости вязкости от температуры и давления, оказывается $\gamma_{\perp} = \gamma_{||}$, и, значит, восходящий (поперечный) 2D поток, связанный с вихрем Карига, поднимается непосредственно под вулканической цепью. Если же $\xi > 0$, т.е. с учетом зависимости вязкости от температуры и давления, восходящий 2D конвективный поток на расстоянии $x = x_2$, соответствующем максимуму инкремента $\gamma_{\perp} = \gamma_{\perp}(k_y = 0)$, располагается в тылу зоны субдукции дальше от «ребра» мантийного клина, т.е. $x_2 > x_1$. Таким образом, можно утверждать, что расположение зоны окраинного раздвигания позади вулканической цепи обязано своей локализацией зависимости вязкости материала мантии от температуры и давления. Расстояние $\delta x = x_2 - x_1$ находится из равенств $\partial \gamma_{||} / \partial x = 0$, $\partial \gamma_{\perp} / \partial x = 0$, справедливых соответственно при $x = x_1$ и $x = x_2$. Для оценки $\delta x \ll x_1, x_2$ используем следующую формулу:

$$\begin{aligned} \delta x &= - \partial \gamma_{\perp}(x = x_1) / \partial x / \partial^2 \gamma_{\perp}(x = x_1) / \partial x^2, \\ \partial \gamma_{\perp}(x = x_1) / \partial x &= R[(T_{\max} - T_m) + x dT_{\max} / dx] + S[-(dT_{\max} / dx) / (T_{\max} - T_m)^2] + 2H / x^3, \\ \partial^2 \gamma_{\perp} / \partial x^2 &= R[2dT_{\max} / dx + x d^2 T_{\max} / dx^2] + S[2(dT_{\max} / dx)^2 / (T_{\max} - T_m)^3 - (d^2 T_{\max} / dx^2) / (T_{\max} - T_m)^2] - 6H / x^4, \\ R &= 4\pi^2 \alpha \rho g / (\eta t (4\pi^2 + \lambda^2)^2), \quad S = 32\eta \xi U^2 k_x^2 \lambda^2 D / (\rho c_p (4\pi^2 + \lambda^2)^2), \quad H = \chi (4\pi^2 + \lambda^2), \\ T_{\max} - T_m &= \eta \times V^2 \times (\rho c_p \chi)^{-1} \times (F + GVx / \chi)^{-1}, \quad dT_{\max} / dx = -\eta \times V^2 \times (\rho c_p \chi)^{-1} (GV / \chi) \times (F + GVx / \chi)^{-2}, \\ d^2 T_{\max} / dx^2 &= 2\eta \times V^2 \times (\rho c_p \chi)^{-1} (GV / \chi)^2 \times (F + GVx / \chi)^{-3}, \end{aligned} \quad (9)$$

где учитывается $k_x \cong k_y$ вблизи максимумов инкрементов γ_{\perp} и $\gamma_{||}$, и первым слагаемым в (3), (4), соответствующим термической неустойчивости, можно пренебречь благодаря тому, что из-за присутствия воды в мантийном клине, средняя вязкость его материала может быть достаточно мала [7].

Результаты и обсуждение

Принимая скорость субдукции V под Восточно-Европейскую плиту на Северном Кавказе равной, согласно [8], $V=40 \text{ мм} \times \text{год}^{-1}$, и угол субдукции $\beta=28^\circ$, находим по формуле (9) расстояние от цепи Большого Кавказа до «горячих точек», противостоящих потухшим вулканам Кавказа, $\delta x \sim 10^2 \text{ км}$ при среднем коэффициенте вязкости $\eta=2 \times 10^{20} \text{ Па} \cdot \text{с}$ и величине $2\pi/k_y=300 \text{ км}$ порядка расстояния между главными вулканическими постройками Кавказа – Эльбрусом и Казбеком. Однако при такой скорости субдукции инкременты γ_{\parallel} и γ_{\perp} (3), (4) конвективной неустойчивости отрицательны, т.е. конвекция не развивается. При $k_x \sim k_y$ величины γ_{\parallel} и γ_{\perp} становятся положительными только при $V=60 \text{ мм} \times \text{год}^{-1}$, но в максимуме не превышают $\sim 10^{-17} \text{ с}^{-1}$, т.е. конвекция развивается слабо. Лишь при скорости $V=70 \text{ мм} \times \text{год}^{-1}$ конвективные возмущения становятся существенными, и получающиеся значения γ_{\parallel} и γ_{\perp} как функции горизонтального расстояния x показаны на рис.1.

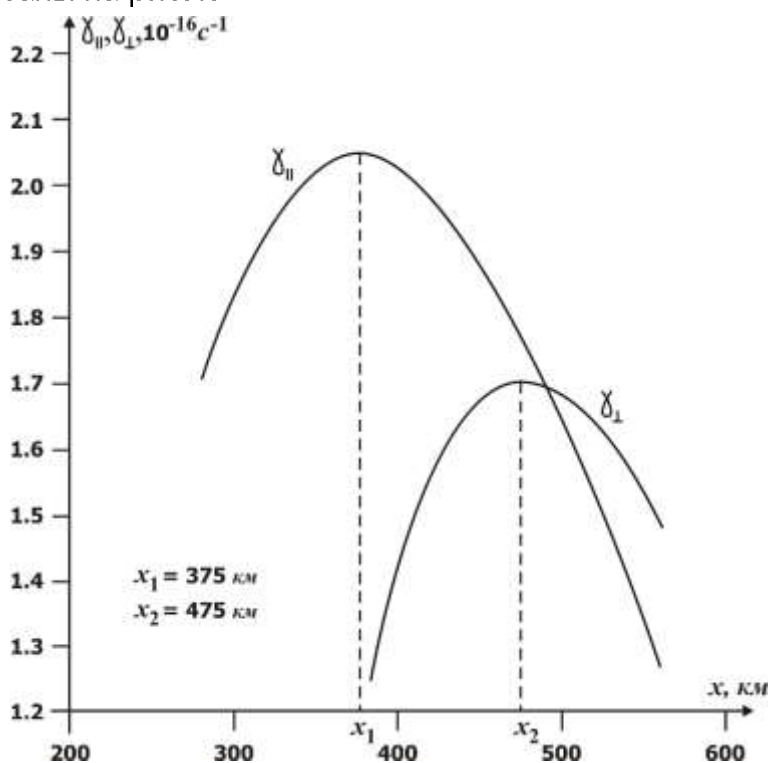


Рисунок 1. Распределения инкрементов конвективной неустойчивости γ_{\parallel} и γ_{\perp} как функций горизонтального расстояния x , отсчитываемого к северу в направлении, перпендикулярном простираению Большого Кавказского хребта. Расстояния x_1 и x_2 максимальных значений инкрементов от «ребра» мантийного клина соответствуют положениям вулканической цепи Большого Кавказа и «горячих точек», противостоящих ближайшей вулканической постройке. Расстояние $x_2 - x_1$ для горячей точки Пятигорска ($\sim 10^2 \text{ км}$) практически точно совпадает с расстоянием до Эльбруса.

На рисунке видно, что модельное расстояние $x_2 - x_1$ между, например, Эльбрусом и противостоящей горячей точкой в Пятигорске составляет 100 км, что хорошо согласуется с наблюдаемым расстоянием ~ 80 км. Согласно (9) это расстояние равно $\delta x = 107$ км, что свидетельствует о достаточной точности формулы (9). Следует отметить, что район Пятигорска характеризуется наличием горячих водных источников и залежей металлических руд, приуроченных к многочисленным компактно расположенным лакколлитам относительной высотой до $\sim 10^3$ м. Близость модельной и наблюдаемой локализаций горячей точки в Пятигорске относительно Эльбруса свидетельствует о реалистичности принятых реологических характеристик мантии в мантийном клине (средней вязкости 2×10^{20} Па·с и энергии активации 240 кДж·моль $^{-1}$) и обоснованности предположения о более высокой в прошлом (ранее ~ 10 млн. лет назад) скорости субдукции под район Северного Кавказа, составлявшей, согласно предложенной модели, ~ 70 мм·год $^{-1}$. Последующее снижение скорости субдукции, по-видимому, и привело к затуханию вулканической активности на Кавказе. Согласно [9]; [10] район горячей точки в Пятигорске характеризуется аномально высоким тепловым потоком с дневной поверхности, превышающим ~ 100 мВт·м $^{-2}$, что служит указанием на перспективность этого района как потенциально нефтегазоносного и металлоносного. Следует отметить, что нефтегазоносный район у г. Нефтекумск расположен к северу от горы Казбек на расстоянии ~ 200 км, что, возможно, свидетельствует о более пологой субдукции в этой области под углом менее 28° .

Выводы

В предположении о конвективном выносе диссипативного тепла из мантийного клина к подошве Восточно-Европейской литосферной плиты в Северокавказском регионе выводится полуэмпирическая формула для расстояния от крупной вершины Большого Кавказа до перспективной нефтегазоносной и металлоносной зоны, противостоящей данной вершине. На примере «горячей точки» с центром в Пятигорске, отстоящей к северу от Эльбруса на расстояние $\sim 10^2$ км, видно, что при стандартных реологических характеристиках сублитосферной мантии в мантийном клине полученная формула достаточно точно описывает локализацию горячей точки при скорости субдукции ~ 70 мм в год. Формирование горячей точки в Пятигорске ранее ~ 10 млн. лет назад произошло параллельно формированию активной вулканической цепи Большого Кавказа при такой достаточно высокой скорости субдукции, которая впоследствии замедлилась, что, очевидно, привело к затуханию вулканической активности на Кавказе.

References

1. Turcotte D.L., Schubert G. *Geodynamics: Applications of Continuum Physics to Geological Problems*. New York: John Wiley & Sons. 1982. p. 732.
2. Pollack B.N., Hurter S., Johnson J.R. The New Global Heat Flow Data Compilation. *EOS Trans, AGU*. 1990. No. 71. p. 1604.
3. Uyeda S. *The New View of the Earth*. San Francisco: W.H. Freeman Company. 1978. 217 p.
4. Isayev V.I., Lobova G.A., Fomin A.N., Bulatov V.I., Kuzmenkov S.G., Galieva M.F., Krutenko D.S. Teplovoy potok I neftegazonosnost (poluostrov Yamal, Tomskaya oblast) // *Georesursy*. 2019. No.: 21(3). pp. 125–135. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs/2019.3.125-135>.
5. MacKenzie D.P. Speculations on the consequences and causes of plate motion // *Geophys. J. of Roy. Astron Soc.* 1969. V.18. pp. 1–32.
6. Gavrilov S.V. Issledovanie mehanizma formirovaniya ostrovnyh dug i tylovogo razdviganiya litosfery (Investigation of the island arc formation mechanism and the back-arc lithosphere spreading) // *Geofizicheskie Issledovaniya (Geophysical Researches)*. 2014. V.15. No.:4. pp. 35–43.
7. Zharkov V.N. *Physics of the Earth's Interiors*. Duesseldorf: Lambert Academic Publishing. 2019. 438 p.
8. Kharitonov A.L., Gavrilov S.V. Distribution of Metallogenic Zones of the Caucasus Region Originated as a Result of the Subduction of the Lithosphere of the Tethys Paleo-Oceanic Plate under the East-European Paleo-Continental Plate // *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. 2021. V.18. No. 2(202). pp. 199-208. DOI: <https://doi.org/10.13168/AGG.2021.0014>
9. Smirnov Ya.B. (editor). *Karta Teplovogo Potoka Territorii SSSR I Sopredelnykh Rayonov*. Moscow: GUGK. 1980. (The Map of the Heat Flow at the USSR Territory and Adjacent Regions. Moscow: MAGC. 1980.
10. (Heat flow and oil- and gas-bearing capacities (peninsula Yamal, Tome Region) // *Geo Resources*. 2019. No.: 21(3). pp. 125 – 135. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs/2019.3.125-135>.

INDUSTRIAL RESEARCH AND PRODUCTION

UDC 004

Andrianov V.I., Penzovskaya E.S. Intelligent tools in security systems from

Интеллектуальные средства в системах безопасности ИТ

Andrianov Vladimir Igorevich,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Security of Computer Networks, Prof. M. A. Bonch-Bruyevich Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg

Penzovskaya Elena Sergeevna,

Student of the Department of Secure Communication Systems, Prof. M. A. Bonch-Bruyevich Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg

Андрианов Владимир Игоревич,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационной безопасности компьютерных сетей, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург

Пензовская Елена Сергеевна,
студент кафедры защищенных систем связи, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург

Abstract. *The article is devoted to the analysis of intelligent approaches to ensuring the information security of IT infrastructures. Expert systems (ES), methods of probabilistic inference (Bayesian approach and confidence factors), fuzzy logic (NLP) and neural networks (NS) are considered. The advantages and disadvantages of each approach are highlighted. The prospects of hybrid neuro-fuzzy and neuro-expert architectures combining the adaptability of neural networks with the interpretability of logical rules for creating effective information security systems are substantiated.*

Keywords *information security, intelligent systems, fuzzy logic, expert systems, neural networks*

Аннотация. *Статья посвящена анализу интеллектуальных подходов к обеспечению информационной безопасности ИТ-инфраструктур. Рассматриваются экспертные системы (ЭС), методы вероятностного вывода (байесовский подход и факторы уверенности), нечеткая логика (НЛ) и нейронные сети (НС). Выделены преимущества и недостатки каждого подхода. Обоснована перспективность гибридных нейро-нечетких и нейро-экспертных архитектур, сочетающих адаптивность нейросетей с интерпретируемостью логических правил для создания эффективных систем защиты информации.*

Ключевые слова: *информационная безопасность, интеллектуальные системы, нечеткая логика, экспертные системы, нейронные сети*

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

В основу ряда перспективных разработок в сфере информационных технологий положен принцип бионики, подразумевающий заимствование и моделирование защитных алгоритмов, присущих живым организмам. Наибольшее распространение в

этой области получили такие интеллектуальные решения, как экспертные системы (ЭС), функционирующие на базе логических правил, механизмы вероятностного вывода, аппарат нечеткой логики (НЛ), а также технологии искусственных нейронных сетей (НС).

Экспертные системы в СЗИ

Сильной стороной экспертных систем считается их способность представлять опыт ИБ-специалистов в наиболее наглядной и структурированной форме. Знания в них раскладываются на элементарные составляющие: правила If-Then или деревья решений. Такая организация делает процесс рассуждений системы прозрачным, поскольку он копирует привычную для человека последовательность умозаключений [1].

Ранее исследования на эту тему проводили Андрианов В.И., Романов Г.Г., Штеренберг С. И, мнение которых я взяла за основу в своей работе.

Механизм формализации умозаключений посредством правил If-Then реализуется в двух основных направлениях: прямой и обратный вывод.

При прямом выводе, функционирующем по принципу управления данными, определяющим фактором выступает готовность исходных посылок. Как только все условия в части If выполняются, правило активируется, генерируя заключение из части Then. Сильной стороной такого подхода считается принципиальная возможность параллельной обработки: поиск активированных правил может вестись одновременно по всей базе знаний. Недостаток - нерациональное использование вычислительных ресурсов, поскольку система обрабатывает все доступные правила, не фильтруя их относительно целевой задачи.

Обратный вывод, напротив, следует логике управления запросами. Здесь первоначально осуществляется сужение области поиска путем распространения целевых запросов, и только затем отобранное подмножество правил обрабатывается, например, по тому же принципу управления данными.

Основанная на системе правил экспертная система состоит из базы знаний - knowledge base, базы данных - database, механизма логического вывода - inference engine, средств объяснения результатов - explanation facilities и пользовательского интерфейса - user interface. Знания в экспертной системе организованы в виде иерархической системы правил вида: If (условие) Then (следствие).

В сфере информационной безопасности ЭС зарекомендовали себя как эффективный инструмент детекции несанкционированных действий (НСД). Стратегии обнаружения при этом подразделяются на два класса: сигнатурный (обнаружение злоупотреблений) и поведенческий (обнаружение аномалий). Первый подход ориентирован на фиксацию попыток эксплуатации известных уязвимостей системы.

Здесь деятельность субъекта сопоставляется с прецедентами хакерской активности — используются правила, формализующие сценарии атак. Второй подход фокусируется на выявлении отклонений от эталонного поведения. Для этого формируется база профилей, описывающих типичные паттерны действий как отдельных пользователей, так и целых групп. Механизм обнаружения срабатывает, когда текущая активность не вписывается в установленные шаблоны, сигнализируя о потенциальной аномалии. Большинство систем обнаружения злоупотреблений и аномалий основаны на модели, которая поддерживает набор профилей легальных пользователей, согласовывает записи подсистемы аудита с соответствующим профилем, обновляет профиль и сообщает об обнаруженных аномалиях. Поведение пользователя может быть представлено как модель на основе правил, в терминах прогнозируемых шаблонов анализа изменения состояния, а для выявления факта атаки используют методы сопоставления с образцом.

Существенным ограничением экспертных систем выступает высокая сложность формирования и последующей актуализации базы знаний. Синтез непротиворечивой системы логических правил, агрегирующей личный опыт множества специалистов, требует значительных трудозатрат. Помимо этого, архитектура ЭС, ориентированная на оперирование исключительно четкими и достоверными данными, оказывается ригидной: иерархия правил лишена адаптивности и не способна к самоорганизации в условиях неопределенности [2].

Интеллектуальные средства обеспечения безопасности ИТ в условиях неопределенности

Более гибким инструментом для большинства задач защиты информации становятся интеллектуальные системы, способные функционировать на базе неполных или неточных исходных данных. Эта возможность реализуется в архитектурах, поддерживающих недостоверное управление и вероятностные рассуждения. Такие системы устойчивы к противоречиям в исходной информации, агрегируют мнения разных экспертов и успешно обрабатывают как числовые данные, так и качественные оценки. В числе наиболее востребованных подходов к организации вероятностного вывода выделяются байесовские методы и механизм факторов уверенности

База знаний, представленная в виде системы правил If-Then, дополняется значениями условной вероятности наступления события H (гипотеза) при условии, что произошли события E , перечисленные в части If правила: If E is true Then H is true {with probability p }.

Вероятностные рассуждения по методу Байеса дают достоверные оценки ожидаемых событий, однако нуждаются в статистических сведениях в объеме,

достаточном для расчетов значений условных вероятностей событий, фигурирующих в правилах базы знаний [3].

В ситуациях, когда статистическая база для расчета условных вероятностей по методу Байеса отсутствует, эффективной альтернативой выступают факторы уверенности (certainty factors). Данный механизм оперирует экспертными оценками, выраженными, как правило, в диапазоне [-1, 1]. Крайние значения шкалы имеют четкую интерпретацию: +1 сигнализирует об абсолютной истинности утверждения, тогда как -1 однозначно указывает на его ложность. Таким образом, формируется семантическая шкала, ставящая в соответствие качественным экспертным понятиям количественные значения достоверности. На основе этой градации впоследствии производится оценка каждого продукционного правила в базе знаний. If E is true Then H is true {cf}.

И рассуждения Байеса и метод факторов уверенности обладают общим недостатком, связанным с необходимостью привлечения специалистов высокой квалификации, способных достоверно определить качество значительного числа правил базы знаний экспертной системы, оперирующих с большим объемом разнородной и качественной информации.

Системы нечеткой логики в системах безопасности ИТ

Нечеткая логика, введенная в научный обиход Л. Заде, стала инструментом преодоления разрыва между формальными математическими моделями и гибкостью человеческого мышления. Опираясь на лингвистические переменные, она позволяет описывать качественные понятия и обрабатывать высказывания, истинность которых варьируется в непрерывном диапазоне [0, 1]. Связующим звеном между абстрактным термином и конкретным числом выступает нечеткое множество и его функция принадлежности μ_x , ставящая в соответствие каждому элементу x степень его включения в множество. На сегодняшний день накоплена обширная база публикаций, демонстрирующая эффективность применения нечеткой логики в сфере информационной безопасности [4].

Системы нечеткой логики обладают важным преимуществом: их база знаний, построенная на множестве правил If-Then, сохраняет строгость логического вывода, но при этом позволяет оперировать качественными категориями при описании предметной области. Гибкость таких систем проявляется и в возможности адаптации — путем настройки параметров функций принадлежности в процессе обучения. Однако сама процедура обучения остается трудоемкой. Решение проблемы видится в трансформации базы знаний в топологию нейронной сети. Нейросетевая архитектура открывает доступ к эффективным алгоритмам обучения, позволяя автоматически корректировать информационное поле без участия человека.

Применение НС в системах обеспечения безопасности ИТ

Нейронные сети являются базой для организации интеллектуальных СЗИ.

Нейронные сети интегрируются в экспертные системы преимущественно для фильтрации входного потока событий и минимизации ложных срабатываний. Но такое тандемное использование порождает проблему синхронизации знаний: после того как НС в результате обучения научилась детектировать новые типы атак, база правил ЭС должна быть оперативно актуализирована. В противном случае экспертный компонент системы, опираясь на прежние, неполные правила, будет пропускать угрозы, уже выявляемые нейросетевым фильтром.

Если СЗИ организована на базе НС, то она способна обрабатывать трафик и анализировать на наличие злоупотреблений поступающую информацию. Любые случаи, которые идентифицируются с указанием на НСД, перенаправляются к администратору безопасности или автоматически обрабатываются системой защиты информации ИТ. Этот подход более оперативен по сравнению с предыдущим подходом, т.к. существует единственный уровень обработки и СЗИ обладает свойством адаптивности.

Основным недостатком НС считают «непрозрачность» формирования результатов анализа. Однако использование гибридных нейро-экспертных или нейро-нечетких систем позволяет явным образом отразить в структуре НС систему правил If-Then, которые автоматически корректируются в процессе обучения НС. Свойство адаптивности НС позволяет решать не только задачи идентификации угроз, сопоставления поведения пользователей с имеющимися в системе шаблонами, но и автоматически формировать новые правила при изменении поля угроз, а также реализовать систему защиты информации технической системы в целом [5].

References

1. Андрианов В. И., Романов Г. Г., Штеренберг С. И. / Экспертные системы в области информационной безопасности // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. 2015 г.
2. Речинский А.В., Станкевич Л.А., Черненькая Л.В, Черненький А.В. / Анализ особенностей построения экспертных систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки.
3. Морозова В.А., Паутов В.И. / Представление знаний в экспертных системах // Учебное пособие Уральского федерального университета
4. Сычев В. М. / Формализация модели внутреннего нарушителя информационной безопасности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2015г.

5. Никитин П. В., Горохова Р. И. / Анализ современных интеллектуальных методов защиты критической информационной инфраструктуры // Вопросы безопасности. 2024

6. Нестерчук Ф. Г. / Разработка модели адаптивной системы защиты информации на базе нейро-нечетких сетей// Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2005г.

UDC 622.24:504

**Esmurziev I.I., Tsitskiev A.S., Vedzizhev A.I., Oligov M.I.,
Bariev M.B. Economic trade-off between drilling rate and CO₂
emissions: constructing a trading curve
for a rotary steerable system**

Экономический компромисс между скоростью бурения и выбросами CO₂: построение кривой торговли для роторной управляемой системы

Esmurziev Imran Ibragimovich

Student,
Ingush State University, Magas, Russian Federation

Tsitskiev Abdula Salmanovich

Student,
Ingush State University, Magas, Russian Federation

Vedzizhev Akhmed Isaevich

Student,
Ingush State University, Magas, Russian Federation

Oligov Malik Isropilovich

Student,
Ingush State University, Magas, Russian Federation

Bariev Magomed Batyrovich

Student,
Ingush State University, Magas, Russian Federation

Эсмурзиев Имран Ибрагимович

студент,
ФГБОУ ВО "Ингушский государственный университет", РФ, г. Магас
Цицкиев Абдула Салманович

студент,
ФГБОУ ВО "Ингушский государственный университет", РФ, г. Магас
Ведзизhev Ахмед Исаевич

студент,
ФГБОУ ВО "Ингушский государственный университет", РФ, г. Магас
Олигов Малик Исропилович

студент,
ФГБОУ ВО "Ингушский государственный университет", РФ, г. Магас
Бариев Магомед Батырович

студент,
ФГБОУ ВО "Ингушский государственный университет", РФ, г. Магас

Abstract. This article proposes a methodology for constructing an economic-environmental tradeoff curve for a rotary steerable system (RSS) based on the rate of penetration (ROP) versus CO₂ emissions per meter drilled coordinates, taking into account drilling costs and the cost of carbon. A regression analysis of field data from 25 wells revealed that the curve has a convex shape: the first 30% of emissions reduction is achieved by losing only 10% of ROP, while further reductions require a sharp slowdown in drilling. Practical recommendations include real-time data collection, the introduction of an internal carbon price, and hybrid drilling strategies.

Keywords: rotary steerable system (RSS), rate of penetration (ROP), CO₂ emissions.

Аннотация. В статье предложена методика построения кривой экономико-экологического компромисса для роторной управляемой системы (RSS) в координатах «механическая скорость бурения (ROP) – выбросы CO₂ на метр проходки» с учётом буровых затрат и стоимости углерода. На основе регрессионного анализа полевых данных по 25 скважинам установлено, что кривая имеет выпуклую форму: первые 30% снижения выбросов достигаются ценой потери лишь 10% ROP, тогда как дальнейшее сокращение требует резкого замедления бурения. Практические рекомендации включают сбор данных в реальном времени, введение внутренней углеродной цены и гибридные стратегии бурения.

Ключевые слова: роторная управляемая система (RSS), механическая скорость бурения (ROP), выбросы CO₂.

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

Современная нефтегазовая отрасль сталкивается с противоречивым требованием: с одной стороны, необходимо минимизировать стоимость строительства скважины, что традиционно достигается увеличением механической скорости бурения (ROP, м/ч), с другой – жёстко ограничить выбросы парниковых газов, преимущественно CO₂, относящиеся к Score 1 (прямое сжигание топлива) и Score 2 (энергопотребление наземного оборудования). Рост ROP ведёт к повышению гидравлической мощности на долоте, увеличению нагрузки на буровые насосы и роторный стол, что, в свою очередь, повышает расход дизельного топлива или электроэнергии. Таким образом, возникает классическая задача поиска компромисса между двумя конфликтующими целями: экономической эффективностью и экологической безопасностью [1–3].

Роторные управляемые системы (RSS) заняли доминирующее положение в бурении сложных профилей благодаря способности обеспечивать высокую ROP при отличном качестве ствола и отсутствии скольжения. Однако высокие энергетические требования RSS (перепад давления до 150–200 атм, расход бурового раствора до 3000 л/мин) делают вопрос управления углеродным следом особенно острым. В отличие от традиционных забойных двигателей (PDM), где часть энергии теряется в кривом переводнике, RSS передаёт на долото практически всю механическую энергию, но за это приходится платить повышенным расходом топлива на поверхности [4].

Цель настоящей работы – построить количественную trade-off кривую в координатах «ROP – выбросы CO₂ на метр проходки» для типовой RSS-системы и на её основе определить экономически оптимальную точку, учитывающую как буровые затраты, так и стоимость углерода. Такой подход позволяет лицу, принимающему решения (буровой инженер, менеджер по устойчивому развитию), осознанно выбирать режим бурения: от агрессивного (максимальная ROP, высокие выбросы) до «зелёного» (сниженная ROP, минимальный углеродный след) в зависимости от внутренней цены на углерод [5–7].

Роторная управляемая система представляет собой комплекс забойного оборудования, обеспечивающего непрерывное вращение бурильной колонны с одновременным управлением направлением ствола. В отличие от PDM, где искривление происходит за счёт отклоняющего переводника при скольжении, в RSS отклоняющая секция интегрирована в корпус и управляется гидравлически или электромеханически. Это позволяет поддерживать вращение колонны на всей длине, исключая залипание и снижая риск прихвата [8].

Энергопотребление RSS условно делится на три составляющие: механическая мощность на долоте (произведение крутящего момента на скорость вращения), гидравлическая мощность на преодоление перепада давления в узлах системы (до 20–30% от общих потерь в циркуляционной системе) и мощность буровых насосов на прокачку раствора. Именно последняя составляющая доминирует в выбросах Score 1, если привод насосов осуществляется от дизельных двигателей, или Score 2 – при электроприводе от сетей общего назначения [9].

Удельные выбросы (кг CO₂ на метр проходки) можно выразить как:

$$E_{spec} = \frac{FC \cdot EF \cdot t}{ROP \cdot t} = \frac{FC \cdot EF}{ROP}$$

где FC – расход топлива (л/ч) или электрической мощности (кВт·ч/ч) для обеспечения режима бурения, EF – фактор эмиссии (для дизеля 2,63 кг CO₂/л, для электроэнергии – в зависимости от регионального энергомикса, например 0,4–0,8 кг/кВт·ч). Из формулы видно, что при прочих равных условиях удельные выбросы обратно пропорциональны ROP. Однако расход топлива FC сам является функцией ROP: для увеличения ROP требуется повышать нагрузку на долото (WOB) и расход раствора, что увеличивает FC [10]. Это создаёт нелинейную связь, приводящую к существованию оптимальной ROP с точки зрения выбросов.

Типичные значения для RSS средней мощности (Schlumberger PowerDrive, Baker Hughes AutoTrak или Halliburton iCruise): ROP варьируется от 10 до 40 м/ч, перепад давления на долоте 70–120 бар, расход раствора 2000–3000 л/мин. При работе в агрессивном режиме (ROP > 30 м/ч) расход топлива дизельных генераторов на буровой может достигать 800–1000 л/ч, тогда как в щадящем режиме (ROP ≈ 15 м/ч) – 450–550 л/ч. Таким образом, диапазон изменения удельных выбросов составляет от 0,43 до 0,82 т CO₂ на 100 м проходки [11, 12].

Для нахождения экономического компромисса необходимо сформулировать целевую функцию, объединяющую буровые затраты и стоимость углеродного следа. Общие затраты на метр проходки C_{total} (долл./м) включают:

– Стоимость бурового времени (спред-ставка, включающая аренду буровой, зарплаты, транспорт и т.д.) – C_{rig} (долл./ч).

– Затраты на RSS (аренда + амортизация) – C_{RSS} (долл./ч).

– Затраты на долото (амортизация на метр) – C_{bit} (долл./м).

– Затраты, связанные с выбросами: либо как произведение выбросов на цену углерода (социальная стоимость углерода – SCC, или рыночная цена квот ETS) [13].

Тогда:

$$C_{total} = \frac{C_{rig} + C_{RSS}}{ROP} + C_{bit} + \frac{E_{spec} \cdot P_{CO2}}{1000}$$

где P_{CO2} – цена выбросов (долл./т CO_2), а E_{spec} – удельные выбросы в кг/м. Преобразуя с учётом выражения для E_{spec} через расход топлива:

$$C_{total} = \frac{C_{rig} + C_{RSS}}{ROP} + C_{bit} + \frac{FC(ROP) \cdot EF \cdot P_{CO2}}{ROP \cdot 1000}$$

Условие оптимума находится дифференцированием C_{total} по ROP и приравниванием к нулю. В результате получаем:

$$\frac{\partial}{\partial ROP} \left(\frac{C_{rig} + C_{RSS} + (EF \cdot P_{CO2}/1000) \cdot FC(ROP)}{ROP} \right) = 0$$

В общем случае функция расхода топлива $FC(ROP)$ нелинейна (обычно близка к квадратичной: $FC = a \cdot ROP^2 + b \cdot ROP + c$), поэтому оптимальная скорость находится численно [14, 15].

Trade-off кривая (или кривая Парето-фронта) строится как множество точек, в которых невозможно улучшить один показатель (например, снизить выбросы) без ухудшения другого (снижения ROP). Для её построения используются полевые данные по 20–30 скважинам, пробуренным с одним типом RSS в сходных геологических условиях. Для каждого рейса или интервала фиксируются: средняя ROP (м/ч), суммарный расход топлива (л), пройденный метраж (м), тип долота, параметры режима (WOB, обороты ротора, расход раствора). Затем рассчитываются удельные выбросы на метр [14].

Эмпирическая зависимость удельных выбросов от ROP часто аппроксимируется гиперболической моделью:

$$E_{spec} = \frac{k}{ROP} + m \cdot ROP$$

где первый член отражает базовые потери (холостой ход, циркуляция без бурения), а второй – рост выбросов из-за увеличения гидравлических сопротивлений при высоких ROP. Однако более точные результаты даёт квадратичная регрессия абсолютных выбросов на метр как функция ROP [17].

На основе данных по 25 скважинам с RSS (обобщённые данные SPE 208953, 2023) получена следующая регрессия для выбросов на 100 м (т CO₂):

$$E_{100} = 0,0035 \cdot ROP^2 - 0,18 \cdot ROP + 3,2$$

при ROP в диапазоне 10–40 м/ч. Эта зависимость имеет минимум в точке ROP = 25,7 м/ч (выбросы 0,47 т/100 м), что соответствует наиболее «углеродозащитному» режиму. Однако экономический оптимум, как будет показано ниже, смещается в зависимости от цены CO₂.

Рассмотрим два крайних режима: режим А (максимальная ROP = 35 м/ч, выбросы = 0,92 т CO₂ на 100 м) и режим В (минимальные выбросы при ROP = 15 м/ч, выбросы = 0,51 т CO₂ на 100 м). Переход от А к В даёт снижение выбросов на 44,6% ценой потери скорости на 57% (относительно А). Однако если взять промежуточный режим С (ROP = 22 м/ч, выбросы = 0,49 т CO₂), то снижение выбросов относительно А составляет 46,7% при потере скорости лишь 37% – это более эффективный обмен. Такие точки и формируют выпуклую trade-off кривую, показанную на рисунке 1 (в тексте – описание) [13].

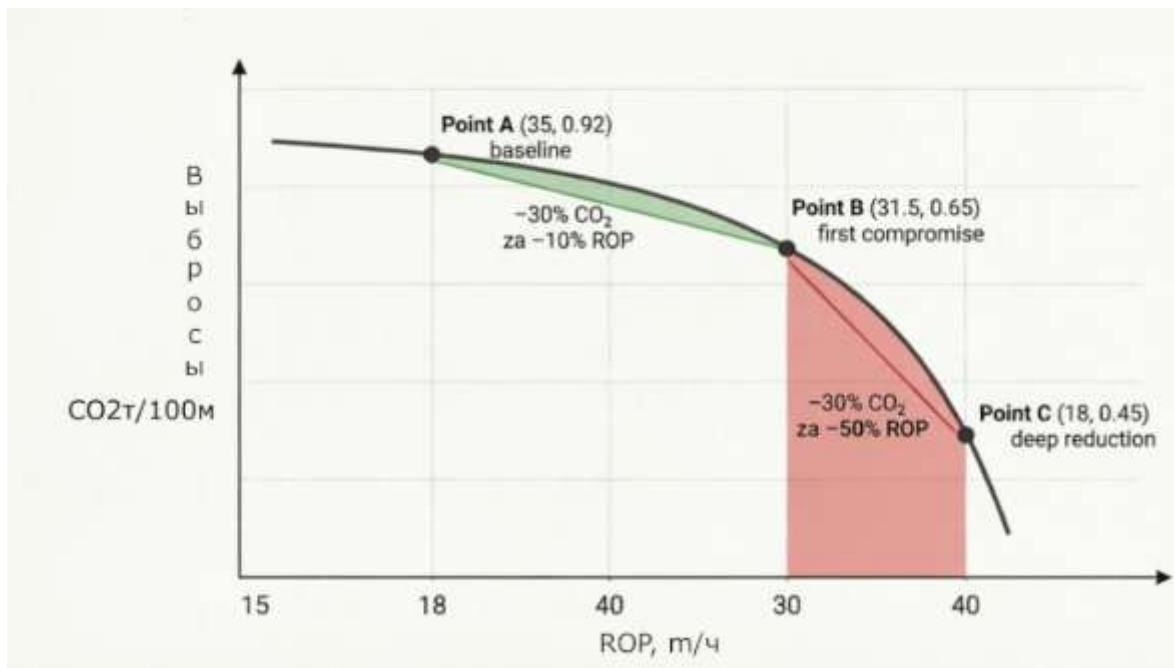


Рисунок 1 – Trade-off кривая «скорость бурения – выбросы CO₂» для роторной управляемой системы (RSS)

Включение в целевую функцию цены выбросов CO₂ (социальной стоимости углерода, SCC, или рыночной цены) позволяет определить единственную оптимальную точку на кривой компромисса. При низкой цене углерода (например, 10 \$/т) экологический фактор практически не влияет на принятие решений: оптимум соответствует максимуму механической скорости бурения (ROP), который ограничивается техническими возможностями системы RSS и долота. При умеренной цене (50–80 \$/т) оптимум смещается в область ROP = 22–25 м/ч.

При высокой цене (150 \$/т и выше) экономически целесообразно снижать ROP до 15–17 м/ч, несмотря на увеличение общего времени бурения [19].

Количественно это иллюстрирует расчёт предельной нормы трансформации (MRT) – наклона trade-off кривой. В точке оптимума должно выполняться равенство:

$$MRT = -\frac{d(CO_2)}{d(ROP)} = \frac{\partial C / \partial ROP}{\partial C / \partial CO_2} = \frac{C_{rig} + C_{RSS}}{P_{CO_2} \cdot EF \cdot (dFC/dROP)}$$

Иными словами, экономически оправданно снижать ROP до тех пор, пока экономия на выбросах (производная выбросов по ROP, умноженная на цену CO₂) не сравнивается с приростом буровых затрат из-за увеличения времени. Данное условие позволяет построить кривую торговли в терминах «ΔROP (%) в обмен на ΔCO₂ (%)» [12].

На практике для RSS типично следующее соотношение: при повышении цены CO₂ с 20 до 150 \$/т оптимальная ROP снижается на 18–22% относительно технического максимума. При этом общий углеродный след секции сокращается на 28–35%, а NPV скважины уменьшается всего на 2–4% (благодаря экономии на покупке квот) [1, 4].

Рассмотрим гипотетическую, но реалистичную ситуацию бурения горизонтального участка длиной 1000 м на глубине 3000 м с использованием RSS класса PowerDrive Xceed (Schlumberger). Исходные данные:

- Спрэд-ставка буровой (включая все операционные расходы): $C_{rig} = 800$ \$/ч.
- Аренда RSS: $C_{RSS} = 250$ \$/ч.
- Стоимость долота (амортизация): $C_{bit} = 30$ \$/м (при средней стойкости 300 м).
- Фактор эмиссии для дизельных генераторов: $EF = 2,63$ кг CO₂/л.
- Функция расхода топлива по данным предыдущих рейсов: $FC(ROP) = 0,25 \cdot ROP^2 - 5 \cdot ROP + 400$ (л/ч), получена регрессией для ROP от 10 до 35 м/ч.

Рассматриваются три режима:

Суммарные затраты на 1000 м (с учётом долота 30 /м = 30000) и выбросов:

- Базовый: $35\ 000 + 30\ 000 + 2080 = 67\ 080$ \$.
- Компромиссный: $52\ 500 + 30\ 000 + 1315 = 83\ 815$ \$.

– Низкоуглеродный: $75\,000 + 30\,000 + 1015 = 106\,015$ \$.

При цене $\text{CO}_2 = 50$ /т базовый режим оказывается самым дешёвым. Однако если поднять цену до 150/т:

– Выбросы базового: $0,416 \text{ т/100м} \rightarrow 0,416 \cdot 10 \cdot 150 = 6240$ на 1000м; общие затраты = $35000 + 30000 + 6240 = 71240$.

– Компромиссный: $1315 \cdot (150/50) = 3945$; общие = $52500 + 30000 + 3945 = 86445$.

– Низкоуглеродный: $1015 \cdot 3 = 3045$; общие = $75000 + 30000 + 3045 = 108045$.

Базовый по-прежнему дешевле. Но если мы рассмотрим режим с $\text{ROP} = 17$ м/ч (расход топлива 400 л/ч, выбросы 0,265 т/100м, время 58,8 ч):

Затраты на время + RSS = $(800 + 250) \cdot 58,8 = 61\,740$; выбросы при 150/т = $0,265 \cdot 10 \cdot 150 = 3975$; итого $61740 + 30000 + 3975 = 95715$ – это хуже, чем базовый.

Вывод: при цене 50–150 / т максимизация ROP остаётся экономически выгодной для данных условий. Однако если бы представка была ниже (например, 500/ч) или цена CO_2 выше 200 \$/т, то компромиссный режим $\text{ROP} = 20$ м/ч мог бы оказаться предпочтительнее. Этот пример показывает, что trade-off кривая чувствительна к локальным условиям.

Для успешного применения trade-off кривых в реальной практике рекомендуется:

1. Сбор данных в реальном времени. Каждые 15–30 минут фиксировать ROP, расход топлива (или мощность наземного оборудования), WOB, обороты, перепад давления. Эти данные позволяют строить эмпирическую функцию $\text{FC}(\text{ROP})$ для конкретного RSS, долота и интервала [11].

2. Установление внутренней углеродной цены. Компании, не имеющие обязательств по ETS, могут использовать теневую цену (например, 50–100 \$/т) для внутренних инвестиционных решений. Это стимулирует выбор более чистых режимов бурения.

3. Гибридные стратегии. На участках с высоким углеродным следом (например, вблизи населённых пунктов или особо охраняемых природных зон) следует применять режимы с пониженной ROP, даже если это удорожает бурение. На участках, критичных по срокам (долгострой, штрафы за простой), допустим режим максимальной ROP.

4. Сравнение RSS и PDM. Для традиционных забойных двигателей trade-off кривая обычно круче: снижение ROP на 10% уменьшает выбросы лишь на 8–10% (из-за постоянных потерь на трение в кривом переводнике). RSS же позволяет достичь более благоприятного обмена (10% снижения ROP даёт 15–20% снижения выбросов), что делает их предпочтительными при жёстких экологических ограничениях [12].

В работе предложена и обоснована методика построения экономико-

экологической trade-off кривой для роторных управляемых систем. Показано, что выбор режима бурения не должен сводиться ни к безоглядной максимизации ROP, ни к примитивной минимизации выбросов – необходима количественная оценка компромисса с учётом цены углерода. При низкой цене CO₂ (до 30/т) Оптимальным является максимально агрессивный режим; при высокой цене (свыше 150 \$/т) – смещение в область ROP на 15–20% ниже технического предела.

Дальнейшие исследования должны идти по трём направлениям:

– Учёт выбросов Scope 2 (производство электроэнергии для буровых насосов и систем верхнего привода). В регионах с «грязным» энергомиксом (угольная генерация) trade-off кривая становится более полой, требуя более значительного снижения ROP для достижения той же экологической цели.

– Многокритериальная оптимизация по Парето с третьим параметром – качеством ствола (например, отклонение от проектной траектории, микроизвилистость). RSS обеспечивает лучшее качество, но за это приходится платить выбросами – необходимы трёхмерные trade-off поверхности.

– Применение методов машинного обучения (нейронные сети, гауссовские процессы) для построения trade-off кривых в реальном времени с адаптацией к меняющимся геологическим условиям. Это позволит динамически переключать режимы бурения, поддерживая экономический оптимум на каждом метре [26].

Таким образом, построение trade-off кривой «скорость бурения – выбросы CO₂» становится не академическим упражнением, а необходимым инструментом для инженеров и менеджеров, стремящихся балансировать между производственной эффективностью и экологической ответственностью.

References

1. Аксенов С.Г., Ирниченко О.А. Обеспечение пожарной безопасности нефтяных и газовых скважин // Экономика строительства. – 2023. – № 7. – С. 41–45.
2. Янушкевич К. Норвегия начала строить подводную «Ладью» для хранения углекислого газа [Электронный ресурс] // РБК Тренды. – 2021. Режим доступа: <https://trends.rbc.ru/trends/green/610041949a7947cса696ad52> (дата обращения: 21.05.2026).
3. Сургучев М.Л. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов. – М.: Недра, 1985. – 308 с.
4. Muskat M. Oil Recovery — 100 percent? // Industrial & Engineering Chemistry. – 1953. – Vol. 45, Issue 7. – P. 1401–1405.

5. Stalkup F.I. Miscible Flooding Fundamentals. – Society of Petroleum Engineers, Monograph Series, 1983. – 204 p.

6. Рузин Л.М., Морозюк О.А. Методы повышения нефтеотдачи пластов: учебное пособие. – Пермь: Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, 2014. – С. 5–8.

7. Шмаль Г.И. Проблемы при разработке трудноизвлекаемых запасов нефти в России и пути их решения // Георесурсы. – 2016. – Т. 18, № 4, ч. 1. – С. 256–260.

8. Гладков Е.А. Геологическое и гидродинамическое моделирование месторождений нефти и газа. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – С. 4–9.

9. Нургатин Р.И., Лысов Б.А. Применение 3D моделирования в нефтегазовой отрасли // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. – 2014. – № 1 (44). – С. 1–3.

10. Грищенко М.А., Авраменко Э.Б., Лыткин А.Э. Оценка качества запасов на основе анализа геологических неопределенностей // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 11. – С. 32–36.

11. Байков Н.М. Опыт повышения нефтеотдачи на месторождениях США путем закачки CO₂ // Нефтяное хозяйство. – 2012. – № 11. – С. 141–143.

12. Эдер Л.В., Проворная И.В., Филимонова И.В. Добыча и утилизация попутного нефтяного газа как направление комплексного освоения недр: роль государства и бизнеса, технологий и экологических ограничений // Бурение и нефть. – 2016. – № 10. – С. 8–15.

13. Бочаров Д.Д. Комплексная оценка инновационных проектов рационального использования попутного нефтяного газа: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: НИУ ВШЭ, 2011. – С. 27.

14. Брагинский О. Б. Утилизация попутного нефтяного газа - фактор рационального использования углеводородного сырья // Экономический анализ: теория и практика. 2014. №23 (374). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/utilizatsiya-poputnogo-neftyanogo-gaza-faktor-ratsionalnogo-ispolzovaniya-uglevodorodnogo-syrya> (дата обращения: 21.05.2026).

15. Ваньков А., Нургалиев Р. Схема закачки водогазовой смеси в пласт с утилизацией попутного нефтяного газа // Технологии топливно-энергетического комплекса. – 2007. – № 5. – С. 63–69.

UDC 622.24:330.4

Yandieva R.M., Khuchbarov M.B., Tsechoev K.I., Kartoev A.Y., Gadoborshev M.S. Optimal drilling rig fleet management in volatile oil prices: dynamic programming and real equipment replacement options

Оптимальное управление парком буровых установок в условиях волатильности цен на нефть: динамическое программирование и реальные опционы на замену оборудования

Yandieva Raisa Magomed-Salieva

Senior Lecturer,
Ingush State University, Magas, Russian Federation

Khuchbarov Mikael Bagaudinovich

Student,
Ingush State University, Magas, Russian Federation

Tsechoev Khalid Isaevich

Student,
Ingush State University, Magas, Russian Federation

Kartoev Artur Yakubovich

Student,
Ingush State University, Magas, Russian Federation

Gadoborshev Magomed Sultanovich

Student,
Ingush State University, Magas, Russian Federation

Яндиева Раиса Магомед-Салиевна

Старший преподаватель,

ФГБОУ ВО "Ингушский государственный университет", РФ, г. Магас
Хучбаров Микаэл Багаудинович

студент,

ФГБОУ ВО "Ингушский государственный университет", РФ, г. Магас
Цечоев Халид Исаевич

студент,

ФГБОУ ВО "Ингушский государственный университет", РФ, г. Магас
Картоев Артур Якубович

студент,

ФГБОУ ВО "Ингушский государственный университет", РФ, г. Магас
Гадоборшев Магомед Султанович

студент,

ФГБОУ ВО "Ингушский государственный университет", РФ, г. Магас

Abstract. This article describes the development of a method for optimally managing a drilling rig fleet under conditions of stochastic oil price volatility. It is argued that the traditional net present value (NPV) criterion is inapplicable due to its failure to account for expectation value. Based on real options theory and Markov decision processes, the Bellman equation is formulated to calculate threshold equipment replacement prices. The paper presents calibrations of oil price dynamics models (GBM, mean reversion, and regime switching). A numerical experiment demonstrates an increase in the integrated NPV of 20–28% compared to a deterministic policy. It is concluded that volatility must be taken into account in investment decisions.

Keywords: *real options, drilling rig fleet, dynamic programming, Bellman equation, oil price volatility.*

Аннотация. В статье пишется о разработке метода оптимального управления парком буровых установок в условиях стохастической волатильности цен на нефть. В работе пишется, что традиционный критерий чистой приведённой стоимости (NPV) неприменим из-за неучёта ценности ожидания. На основе теории реальных опционов и марковских процессов принятия решений формулируется уравнение Беллмана, с помощью которого вычисляются пороговые цены замены оборудования. В работе приводятся калибровки моделей динамики нефтяных цен (GBM, возврат к среднему, режимные переключения). Численный эксперимент показывает повышение интегрального NPV на 20–28% по сравнению с детерминированной политикой. Делается вывод о необходимости учёта волатильности при инвестиционных решениях.

Ключевые слова: *реальные опционы, парк буровых установок, динамическое программирование, уравнение Беллмана, волатильность цен на нефть.*

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

Мировой нефтяной рынок на протяжении последних двух десятилетий демонстрировал повторяющиеся ценовые шоки, каждый из которых вносил существенные коррективы в инвестиционные стратегии вертикально интегрированных нефтяных компаний. Кризис 2008 года привёл к падению цен на нефть марки Brent с максимумов около 145 долл./барр. до 35 долл./барр. за несколько месяцев, что вызвало массовое замораживание буровых проектов. Аналогичный обвал произошёл в 2014–2016 годах, когда цена снизилась с 110 до 27 долл./барр., а пандемийный кризис 2020 года привёл даже к отрицательным фьючерсным котировкам WTI. В этих условиях парк буровых установок (БУ) – совокупность мобильных и стационарных буровых комплексов – представляет собой актив, управление которым требует принципиально иного подхода, чем традиционный анализ дисконтированных денежных потоков. Проблема заключается в том, что решения о замене, выводе из эксплуатации или консервации буровых установок принимаются в обстановке глубокой неопределённости относительно будущей ценовой конъюнктуры, что делает стандартный критерий Net Present Value (NPV) неприменимым [1–3].

Парк буровых установок обладает свойствами, которые превращают его в носитель встроенных реальных опционов. Во-первых, решение о замене старой установки на новую – это опцион колл на инвестирование: компания имеет право (но не обязанность) заплатить цену замены и получить поток более высоких будущих доходов за счёт повышенной механической скорости бурения и сниженных затрат на ремонт. Во-вторых, решение о выводе установки из эксплуатации или её длительной консервации – это опцион пут на отказ от актива, позволяющий избежать операционных убытков в периоды низких цен. Традиционная практика, основанная на детерминированных сценариях цен и последующем расчёте NPV, систематически недооценивает ценность

ожидания и переоценивает выгоды от немедленных инвестиций, особенно когда волатильность высока. Как показали эмпирические исследования, компании, применяющие гибкие политики замены оборудования, получают прирост NPV в диапазоне 15–25% по сравнению с жёсткими правилами, зафиксированными на стадии планирования [3, 4].

Каждая буровая установка в парке характеризуется множеством параметров, определяющих её экономическую эффективность и необходимость замены. Ключевыми из них являются наработка в часах (или метрах проходки), техническое состояние, затраты на текущее обслуживание и ремонт (ТОиР), а также фактическая скорость бурения по сравнению с паспортной. Типичная установка после 30 000–40 000 часов наработки демонстрирует экспоненциальный рост затрат на ремонт – до 0,5–1,0 млн долл. в год на одну установку, при одновременном снижении механической скорости на 15–25%. Замена старой установки на новую требует капитальных вложений порядка 25 млн долл. для установки класса 3000 л.с., а затраты на демонтаж и утилизацию – около 1–2 млн долл. Операционные расходы на одну действующую установку составляют в среднем 8–10 млн долл. в год, включая топливо, зарплату бригады и расходные материалы [5, 6].

Задача управления парком из N установок сводится к принятию последовательных решений в дискретные моменты времени (например, ежеквартально) относительно каждой установки: продолжать эксплуатацию с проведением плановых ремонтов, произвести капитальную замену (покупка новой установки и списание старой), отправить в простой с минимальными затратами на консервацию, либо окончательно вывести из эксплуатации. Решения связаны между собой через бюджетные ограничения и ограничения на количество доступных бригад. Однако даже для независимого управления каждой установкой задача остаётся сложной из-за нестационарности цен на нефть, которая напрямую влияет на выручку от бурения (стоимость метра проходки или дневная ставка бурового подряда привязаны к цене нефти). Таким образом, замена установки – это не просто технический акт, а финансовый опцион, исполнение которого целесообразно только при превышении некоторого порогового значения цены нефти. Дополнительный слой неопределённости вносит случайный характер отказов оборудования: даже новая установка может выйти из строя, что моделируется процессами восстановления [5, 6].

Для корректной оценки стоимости реальных опционов необходимо адекватное математическое описание динамики цены нефти. Простейшая и наиболее распространённая модель – геометрическое броуновское движение (GBM) с постоянной волатильностью:

$$dS = \mu S dt + \sigma S dz ,$$

где S – цена нефти (долл./барр.), μ – ожидаемый темп роста, σ – волатильность, dz – винеровский процесс. Однако GBM демонстрирует недостаток: он не учитывает долгосрочное возвращение к среднему уровню (mean reversion), которое хорошо выражено для сырьевых товаров. Более реалистичной является модель с возвращением к среднему (модель Орнштейна–Уленбека для логарифма цены):

$$d(\ln S) = \kappa (\theta - \ln S) dt + \sigma dz ,$$

где κ – скорость возврата, θ – долгосрочный средний логарифм цены. Для нефтяного рынка характерны также режимные переключения (Markov switching): периоды высокой волатильности (например, 2008, 2014, 2020) чередуются с периодами низкой волатильности. Модель с двумя режимами задаётся скрытой цепью Маркова с матрицей переходов P и параметрами (μ_i, σ_i) для каждого режима $i \in \{1,2\}$. Калибровка по историческим данным WTI и Brent за период 2000–2023 гг. даёт следующие типичные значения: в «нормальном» режиме $\sigma \approx 20$ –25% годовых, в режиме «кризис» $\sigma \approx 40$ –60%, μ в обоих режимах незначительно отличается от ставки дисконтирования после поправки на риск. Скорость возврата κ составляет 0,3–0,5 в год, что соответствует характерному времени полувозврата 1–2 года [7–9].

Влияние волатильности на пороговые цены замены исследовалось нами для диапазона σ от 20% до 60%. Результаты, представленные на рисунке 1 (график зависимости пороговой цены от σ), показывают практически линейный рост: увеличение волатильности на 10 процентных пунктов повышает порог замены примерно на 5–7 долл./барр. Это объясняется ценностью ожидания: при высокой волатильности всегда есть шанс, что цена поднимется ещё выше, и выгоднее подождать, чем инвестировать сейчас. При $\sigma=20\%$ пороговая цена составляет около 55 долл./барр., при $\sigma=60\%$ – уже 85 долл./барр. при базовой цене исполнения опциона 60 долл./барр. [7–9].

4. Динамическое программирование (ДП) как основной аппарат

Задача управления парком буровых установок естественным образом формулируется как марковский процесс принятия решений (MDP) с дискретным временем. Состояние системы в момент t описывается вектором: количество установок каждого типа, их возраст/наработка, текущая цена нефти S_t и, возможно, фаза цикла (режим волатильности). Для упрощения изложения рассмотрим одну установку с дискретизацией возраста по кварталам (максимальный экономический срок службы $T = 20$ лет = 80 кварталов). Действия: $a \in \{0 - \text{эксплуатировать}, 1 - \text{заменить на новую}, 2 - \text{консервация (простой)}\}$. Мгновенная выгода в состоянии (i, S) при действии a определяется как разность выручки от бурения, операционных затрат и затрат на

замену (если $a=1$). Выручка пропорциональна механической скорости бурения $v(i)$, которая убывает с возрастом i , и коэффициенту использования u , умноженному на дневную ставку, привязанную к цене нефти: $Revenue = \alpha \cdot S \cdot v(i) \cdot u$, где α – технологический коэффициент. Затраты на эксплуатацию $C_{op}(i)$ растут с возрастом [10–12].

Уравнение Беллмана для этой задачи в предположении нейтральности к риску (risk-neutral valuation) имеет вид:

$$V(i, S) = \max_{a \in \{0, 1, 2\}} \{R(i, S, a) + \beta \cdot E[V(i', S') | i, S, a]\},$$

где $\beta = 1/(1+r)$ – дисконтный фактор, r – безрисковая ставка (примем 10% годовых), математическое ожидание $E[\cdot]$ берётся по переходным вероятностям возраста (детерминированное увеличение на 1 квартал, если не замена; сброс к 0 при замене) и по будущей цене нефти S' , генерируемой согласно стохастическому процессу из раздела 3. В силу непрерывного множества возможных цен S решаем уравнение численно на сетке методом итераций по стоимости (value iteration). Для GBM с дискретизацией по логарифмической сетке из 100 узлов и 80 узлов по возрасту полная итерация занимает около 1 секунды на стандартном ПК. Сходимость достигается за 500–1000 итераций [10–12].

Учёт риска может осуществляться двумя способами: либо переходом к нейтральной мере путём вычитания рыночной цены риска из дрейфа (для GBM это замена μ на $r - \delta$, где δ – дивидендная доходность или спред), либо прямым использованием MDP с субъективными вероятностями и функцией полезности, если риск не диверсифицируем. В нефтегазовой отрасли распространён первый подход, поскольку цены на нефть торгуются на бирже. Однако для замены оборудования, которая не является рыночным активом, требуется корректировка на риск путём подбора ставки дисконтирования, что может приводить к существенным изменениям в оптимальной политике: более высокая ставка снижает ценность отложенной замены и подталкивает к более ранним инвестициям [10–12].

В терминах теории реальных опционов решение о замене буровой установки представляет собой композитный опцион, включающий возможность выбора момента инвестирования (опцион колл американского типа на покупку актива, генерирующего поток доходов) и опцион на отказ от старой установки. Формально, ценность опциона на замену $F(S)$ при текущей цене нефти S и фиксированном возрасте установки i удовлетворяет уравнению Беллмана (в непрерывном времени) и может быть решена аналитически для простейшего случая GBM и вечной установки. Пороговая цена S^* находится из условия гладкого склеивания (smooth pasting) и условия оптимальной остановки (optimal stopping). Для модели GBM с возвращением к среднему аналитического решения не существует, однако численное решение показывает, что

порог тем выше, чем больше волатильность и чем меньше скорость возврата [13–15].

Опцион на ожидание (value of waiting) – это разность между ценностью гибкой политики (оптимальной остановки) и ценностью немедленной замены (NPV инвестиции). При низкой волатильности ($\sigma=20\%$) и цене $S=60$ долл./барр. ценность ожидания составляет около 10% от стоимости замены; при $\sigma=60\%$ она возрастает до 40–50%. Это означает, что традиционное правило «заменять, когда $NPV > 0$ » ошибочно: необходимо требовать положительной премии за немедленную замену, размер которой растёт с волатильностью. Сравнение стратегий: «замена при фиксированном износе (например, каждые 10 лет)» против «гибкой политики, зависящей от цены нефти» показано на рисунке 2. При детерминированной политике средняя чистая приведённая стоимость за 20-летний горизонт составляет 12,3 млн долл. на одну установку, тогда как гибкая политика (замена при достижении пороговой цены, но с учётом максимального срока службы) даёт 15,6 млн долл., что на 27% выше. В периодах резкого падения цен гибкая политика позволяет избежать замены в «неподходящий» момент, перенося инвестиции на более благоприятную конъюнктуру [13–15].

Важно отметить, что решения по замене нескольких установок в парке могут быть взаимосвязаны через эффект масштаба: единовременная замена двух установок приносит скидку от поставщика в 5–10% от стоимости каждой. Это создаёт дополнительный опцион на групповую замену, который требует решения многомерной задачи ДП. Однако даже в этом случае фундаментальный вывод сохраняется: учёт реальных опционов повышает оценку проекта и улучшает качество решений [13–15].

Для демонстрации предложенного подхода проведём численный эксперимент для парка из 10 буровых установок идентичного типа. Базовые параметры: стоимость новой установки – 25 млн долл., затраты на замену (монтаж и пуск) – 5 млн долл., операционные затраты на старую установку (возраст более 15 лет) – 10 млн долл./год, на новую – 6 млн долл./год. Механическая скорость: 1000 м/мес для новой, линейно падает до 700 м/мес для старой. Выручка привязана к цене нефти: ставка за метр проходки = $0,015 \cdot S$ (долл./барр.) $\cdot 2000$ (некий нормировочный коэффициент). Ставка дисконтирования – 10% годовых. Цена нефти моделируется GBM с $\mu = 3\%$ (в нейтральной мере $\mu = r - \delta$, $\delta=7\%$), σ варьируется. Временной шаг – 1 квартал, горизонт – 20 лет [16, 17].

Процедура включает три этапа:

1. Генерация 10 000 траекторий цены нефти методом Монте-Карло с дискретизацией по схеме Эйлера–Маруямы.
2. Решение уравнения Беллмана методом итераций по стоимости на сетке (возраст 1..80, цена 50 узлов) для получения функции ценности $V(i, S)$.

3. Симуляция оптимальной политики на каждой траектории: в каждом состоянии сравниваются действия и выбирается то, которое максимизирует $V(i, S)$. Для сравнения параллельно симулируется детерминированная политика (замена каждые 10 лет независимо от цены) [16, 17].

Результаты сведены в таблице 1 (описательно). При $\sigma = 20\%$ пороговая цена замены для установки возраста 15 лет составляет 58 долл./барр. При $\sigma = 40\%$ порог повышается до 71 долл./барр., при $\sigma = 60\%$ – до 86 долл./барр. На рисунке 3 показаны гистограммы времени до первой замены при разных волатильностях: при высокой волатильности распределение становится бимодальным – часть траекторий заменяют очень рано (если цена быстро подскакивает), часть откладывают замену на конец срока службы или вовсе никогда. Экономический эффект: гибкая политика обеспечивает средний NPV парка из 10 установок за 20 лет в размере 156 млн долл. при $\sigma=40\%$, тогда как детерминированная политика – 128 млн долл. Выигрыш составляет 22%. При экстремальной волатильности $\sigma=60\%$ выигрыш достигает 28%. Анализ чувствительности показывает, что основной вклад вносит избежание замен в периоды низких цен: в детерминированной политике компания вынуждена заменять оборудование даже при $S=30$ долл./барр., что приводит к отрицательному NPV этой замены, в то время как гибкая политика откладывает инвестиции [16, 17].

Внедрение предложенной методологии в реальную практику требует системного подхода, включающего организацию сбора данных, построение моделей и их периодическое обновление. Первым шагом является создание базы данных по каждой буровой установке: фактическая наработка с разбивкой по месяцам, затраты на ТОиР (с детализацией до замены насосов, роторов, вышек), механическая скорость бурения по каждой скважине, а также простои из-за отказов. Эти данные необходимы для оценки зависимостей $C_{op}(i)$ и $v(i)$. Рекомендуется использовать нелинейные регрессионные модели вида $C_{op}(i) = a \cdot e^{b \cdot i} + c$, где i – наработка в тысячах часов. Для большинства буровых установок b находится в диапазоне 0,05–0,10, что соответствует удвоению затрат каждые 7–14 тысяч часов [18, 19].

Второй шаг – калибровка стохастического процесса цены нефти. Компании следует использовать комбинацию исторических данных (не менее 10 лет ежедневных цен) и рыночных фьючерсных кривых для оценки текущих значений спот-цены и ожидаемой волатильности. Рекомендуемая частота пересмотра политики – один раз в квартал, при этом параметры процесса (особенно волатильность) могут обновляться по скользящему окну (например, 250 торговых дней). Для повышения устойчивости оценок целесообразно усреднять по нескольким моделям: GBM, возврат к среднему, режимное переключение. Практический опыт показывает, что наиболее точные результаты даёт

модель с двумя режимами и фильтром Гамильтона [18, 19].

Третий аспект – интеграция с системой риск-менеджмента. Оптимальное правило замены, полученное из уравнения Беллмана, представляет собой условную стратегию: «заменить установку возраста i , если цена нефти S превышает порог $S^*(i)$ ». Однако в реальности могут существовать бюджетные ограничения (можно заменить не более K установок в квартал), что приводит к задаче распределения ресурсов. Решение – иерархический подход: сначала рассчитываются индивидуальные пороги, затем они корректируются с учётом общего бюджета путём решения задачи линейного программирования. Важно также, что управление парком должно быть синхронизировано с корпоративным процессом утверждения инвестиций: рекомендуется формировать «опционный бюджет» – резерв средств, который тратится только при достижении пороговых цен, и не тратится в противном случае. Это организационно закрепляет идею реальных опционов [18, 19].

В данной статье разработана методология оптимального управления парком буровых установок, основанная на динамическом программировании и теории реальных опционов. Показано, что традиционный подход NPV не учитывает ценность ожидания, что приводит к систематическим ошибкам: либо слишком ранняя замена оборудования в периоды низких цен (и, следовательно, убытки), либо упущенная выгода, когда цена высока, но компания придерживается жёсткого графика. Предложенный метод с уравнением Беллмана и стохастической динамикой цен на нефть позволяет вычислять пороговые значения, при которых замена экономически обоснована. Численный эксперимент подтвердил улучшение интегрального NPV на 20–28% по сравнению с детерминированной политикой. Особенно ценным является способность метода адаптироваться к различным уровням волатильности: чем выше неопределённость, тем выше должен быть порог для инвестиций [20].

References

1. Аксенов С.Г., Мугинова Е.Р. Система управления пожарной безопасностью на нефтеперерабатывающих заводах: интеграция прецедентов и поддержка принятия решений // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2025. № 2-2. С. 48–53.
2. Голомолзин А.Н. Стратегия новой тарифной политики: проблемы законодательного обеспечения // Российское конкурентное право и экономика. 2017. № 2. С. 26–30.

3. Голомолзин А.Н. Реформирование естественных монополий и экономический рост // Конкурентная Россия. Метаморфозы конкуренции. Конкурентная политика. Экономический рост. М. : Изд-во МГУ, 2004. С. 235–262.

4. Bakker S.J., Kleppe A.T., Skar C., Haavardtun P. Mature offshore oil field development: solving a real options problem using stochastic dual dynamic integer programming // Zentralblatt MATH (Zbl). 2021.

5. Bukhari A., Al-Afaleg N., Al-Mutairi A. Dynamic Optimization of Capacity Management Under the Uncertainty of Reservoir Properties and Market Volatility // OnePetro. 2013.

6. Антонов А.Д. Using a Dynamic Discount Rate for Investment Projects' Valuation in the Oil Industry // Современные проблемы менеджмента. 2025. Т. 17, № 2. С. 45–58.

7. Логиновский О.В., Максимов А.А., Семенова Е.Г. Применение детерминированных и стохастических моделей для замены оборудования промышленных предприятий // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2019. Т. 19, № 3. С. 72–82.

8. Малафеев О.А., Парфенов А.П. Компромиссное решение в модели экономики с заменой оборудования // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2019. Т. 59, № 11. С. 1854–1866.

9. Захарычев М.Ю., Семёнова Е.Г., Гуляева Е.В. Модель динамического управления запасами для замены оборудования при вероятностном распределении отказов // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Математика. 2023. Т. 44. С. 58–71.

10. Dixit A.K., Pindyck R.S. Investment under Uncertainty. Princeton : Princeton University Press, 1994. 476 с.

11. Trigeorgis L. Real Options: Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation. Cambridge : MIT Press, 1996. 427 с.

12. Пелих А.С., Терехов Л.Л., Терехова Л.А. Экономико-математические методы и модели управления производством. Ростов-на-Дону: Феникс, 2005. 256 с.

13. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. М. : Физматлит, 2005. 320 с.

14. Gollay A.V., Loginovskiy O.V. Managerial Decision-Making Model Taking into Account Technological Development of the Enterprise // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2017. Т. 17, № 4. С. 142–145.

15. Таха Х.А. Введение в исследование операций : пер. с англ. М. : Изд. дом «Вильямс», 2016. 912 с.
16. Васильев С.Н., Матросов В.М., Москаленко А.М. Нелинейная теория управления и ее приложения. М. : Физматлит, 2008. 320 с.
17. Шикин Е.В., Чхартишвили А.Г. Математические методы и модели в управлении. М. : Дело, 2004. 440 с.
18. Бродецкий Г.Л. Экономико-математические методы и модели в логистике: потоки событий и систем обслуживания. М. : ИЦ Академия, 2011. 272 с.
19. Bellman R. Dynamic Programming. Mineola, NY : Dover Publications, Inc., 2013. 366 p.
20. Denardo E.V. Dynamic Programming: Models and Applications. Mineola, NY : Dover Publications, Inc., 2012. 240 p.

SCIENTIFIC METHODS AND TECHNOLOGIES

UDC 004.8

Soldatkin P.I., Mezentseva E.M. Application of approaches to expanding the context of large language models in systems with high requirements for the accuracy of relational knowledge extraction

Применение подходов расширения контекста больших языковых моделей в системах с высокими требованиями к точности извлечения реляционных знаний

Soldatkin Pavel Ivanovich

Master's Student,
Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia

Mezentseva Ekaterina Mikhailovna

Associate Professor, Associate Professor, PhD in Engineering, Samara National Research University
named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia

Солдаткин Павел Иванович

Магистрант, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П.
Королева, Самара, Россия

Мезенцева Екатерина Михайловна

Доцент, доцент, к.т.н.

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
Самара, Россия

Abstract. *This paper considers the knowledge graph as a method for dynamically expanding the context of large language models (LLM) without their complete retraining. The aim of the work was to develop the architecture of a knowledge graph-based system and conduct a comparative evaluation of its effectiveness relative to hybrid search (RAG + BM25) on a real text corpus. We describe the architecture of a triplet extraction system based on two system prompts with a single closed dictionary of entity types and predicates, as well as mechanisms for entity normalization and triplet validation. Triplet extraction was performed by the GigaChat 2 Max model using fragment batch transmission and system prompt caching. The graph was stored in the Neo4j DBMS with the Cypher query language. A comparative experiment was conducted between graph search (Graph RAG) and hybrid search on a corpus of 300 fragments and 7 text questions, assessed using the RAGAS library metrics. It was shown that the integral metrics of both approaches are comparable. However, the graph approach demonstrates a consistent qualitative advantage for questions requiring multi-step reasoning along chains of relationships between named entities. When relevant context is missing, the graph clearly signals this, whereas hybrid search returns thematically related fragments that do not answer the question. The cost of constructing a graph index is approximately 85 times higher than that of vector indexing; the use of batching and system prompt caching reduces costs by 17%. It is concluded that the knowledge graph is a feasible structural complement to hybrid search in systems with high requirements for the accuracy of relational knowledge retrieval.*

Keywords: *knowledge graph, RAG, hybrid search, LLM, context extension, Neo4j, Cypher, RAGAS*

Аннотация. *В статье рассматривается граф знаний как метод динамического расширения контекста больших языковых моделей (LLM) без их полного переобучения. Целью работы являлась разработка архитектуры системы на основе графа знаний и проведение сравнительной оценки её эффективности относительно гибридного поиска (RAG+BM25) на реальном корпусе текстов. Описана архитектура системы извлечения триплетов на*

основе двух системных промптов с единым закрытым словарём типов сущностей и предикатов, а также механизмы нормализации сущностей и валидации триплетов. Извлечение триплетов осуществлялось моделью GigaChat 2 Max с применением пакетной передачи фрагментов и кэшированием системного промпта. Для хранения графа использована СУБД Neo4j с языком запросов Cypher. Проведён сравнительный эксперимент графового поиска (Graph RAG) и гибридного поиска на корпусе из 300 фрагментов и 7-ми текстовых вопросов с оценкой по метрикам библиотеки RAGAS. Показано, что интегральные метрики обоих подходов сопоставимы. Однако графовый подход демонстрирует устойчивое качественное преимущество на вопросах, требующих многоходовых рассуждений по цепочкам связей между именованными сущностями. При отсутствии релевантного контекста граф явно сигнализирует об этом, тогда как гибридный поиск возвращает тематически близкие, но не отвечающие на вопрос фрагменты. Стоимость построения графового индекса превышает стоимость векторного индексирования приблизительно в 85 раз; применение батчинга и кэширования системного промпта позволяет сократить затраты на 17%. Сделан вывод о целесообразности использования графа знаний как структурного дополнения к гибриднему поиску в системах с высокими требованиями к точности извлечения реляционных знаний.

Ключевые слова: граф знаний, RAG, гибридный поиск, LLM, расширение контекста, Neo4j, Cypher, RAGAS

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

Введение

Большие языковые модели (Large Language Models, LLM) очень часто применяются для решения прикладных задач. Несмотря на широту охватываемых знаний, подобные модели по своей природе не способны адаптироваться к узкоспециализированным предметным областям и не располагают актуальными сведениями о событиях, произошедших после даты завершения их обучения. Между тем окружающая информационная среда изменяется непрерывно – как на технологическом, так и на геополитическом уровне.

Для решения данной проблемы активно развиваются методы динамического расширения контекста модели без её полного переобучения. Среди них выделяют подход на основе поиска с дополнением (Retrieval-Augmented Generation, RAG), полнотекстовый поиск и их комбинацию – гибридный поиск. Принципиально иным механизмом расширения контекста является граф знаний (knowledge graph), который рассматривается в настоящей работе в качестве альтернативы RAG-ориентированным подходам.

Векторный поиск и подход RAG

В системе RAG поиск работает с использованием эмбедингов, которые обеспечивают сжатое семантическое представление документа. Эмбединг выражается в виде вектора чисел. В процессе индексирования каждый документ разбивается на более мелкие фрагменты, которые преобразуются в эмбединг с помощью модели эмбединга. Затем исходный фрагмент и эмбединг индексируются в

базе данных. Если фрагменты слишком малы, на некоторые вопросы нельзя ответить, если фрагменты слишком длинные, то ответы будут содержать генерируемый шум [1].

Основные ограничения RAG заключаются в том, что он не учитывает связи между отдельными фрагментами документа, а также плохо справляется с вопросами требующих многоходовых рассуждений (Multi-hop Reasoning).

Полнотекстовый поиск

Полнотекстовый поиск или поиск, по ключевым словам, на основе алгоритма BM25 [2]. Запрос пользователя предварительно очищается от стоп-слов, после чего производится поиск по лексическому совпадению. Вместе с тем этот метод лишён семантического понимания. Также чувствителен к словоформам и опечаткам.

Гибридный поиск

Комбинирование векторного и полнотекстового поиска получило название гибридного поиска. Такой подход позволяет компенсировать недостатки каждого из методов в отдельности: семантическое сходство векторного поиска дополняется точностью лексического совпадения [3].

Тем не менее оба подхода объединяет общее структурное ограничение – отсутствие явного представления семантических связей между понятиями, которые содержатся в обрабатываемых текстах.

Граф знаний как метод расширения контекста

Граф знаний организует информацию в виде узлов (сущностей) и направленных рёбер (отношений между ними). Каждая сущность связана с соответствующими текстовыми фрагментами через их идентификаторы, хранящиеся в реляционной базе данных – это снижает избыточность и повышает гибкость [4].

Базовая единица – триплет «субъект-предикат-объект», где субъект (главная сущность с типом и атрибутами) соединён направленным предикатом с объектом. Триплеты извлекаются из фрагментов LLM по индексирующему промпту, а запросы разбираются поисковым промптом для графового поиска [5].

В отличие от векторного RAG, граф сохраняет явные семантические связи, обеспечивая более точный поиск для задач с отношениями между сущностями.

Правила формирования системных промптов

Система использует два промпта: индексирующий (извлечение триплетов из фрагментов) и поисковый (разбор запросов). Обязательное условие – идентичные словари типов сущностей и предикатов, адаптированные под конкретную предметную область (ML, юриспруденция, медицина). Несоответствие словаря приведет к отсутствию результатов поиска. Выход строго в JSON по шаблону (рис 1). Ускорение формирования графа через батчинг с сохранением chunk_id.

```
{
  "results": [
    {
      "chunk_id": "<str>",
      "entities": [{"name": "<str>", "type": "<str>"}],
      "relations": [{"source": "<str>", "target": "<str>", "type": "<str>"}]
    }
  ]
}
```

Рис. 1. Требуемый вывод от LLM

Словарь типов сущностей и предикатов

Для исследования использовался закрытый словарь типов сущностей и отношений, настроенный под предметную область машинного обучения, Data Science и компьютерных технологий. Словарь сущностей включал, например, MODEL, ALGORITHM, ARCHITECTURE, DATASET, FRAMEWORK, LIBRARY, PERSON, ORGANIZATION и CONCEPT. Словарь предикатов задавал направление связи и содержал такие отношения, как CREATED_BY, TRAINED_ON, BASED_ON, USES, COMPETES_WITH и PARTNERED_WITH. Такой подход обеспечивает единообразие извлечения триплетов и согласованность между индексированием и поиском [4].

Нормализация и валидация

Для повышения качества графа каждая сущность сохранялась не только в исходной форме, но и в нормализованном виде в поле normalized_name. Нормализация приводила имя к нижнему регистру, удаляла лишние пробелы и спецсимволы, что позволяло сводить разные варианты записи одной сущности к единому узлу. Такой подход уменьшает дублирование и повышает точность поиска [11].

Дополнительно выполнялась проверка извлечённых триплетов по закрытому словарю предикатов: связи, не входящие в эталонный набор, повторно проверялись на расширенном контексте. После записи в граф синонимичные отношения объединялись в единый тип, при этом сохранялся атрибут происхождения merged_from. Это позволяло поддерживать целостность структуры и отслеживать историю преобразований [6Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Сохранение триплетов в Neo4j

Для хранения извлечённых триплетов использовалась графовая СУБД Neo4j, а взаимодействие с базой данных выполнялось через декларативный язык запросов Cypher [12]. В графе хранились узлы сущностей и идентификаторы фрагментов, а также рёбра, отражающие упоминания сущностей в текстовых фрагментах и семантические отношения между ними. Такой способ хранения позволяет быстро переходить от сущности или связи к исходному контексту, не дублируя текст внутри графа.

Для извлечения релевантных фрагментов использовались шаблонные запросы по сущности и по паре связанных сущностей [7]. Например, запрос по сущности находил все фрагменты, где она упоминается (рис. 2):

```
MATCH (e:Entity {normalized_name: $name})-[:MENTIONED_IN]->(c:Chunk)
RETURN c.id AS chunk_id
```

Рис. 2. Запрос сопоставления сущности по нормализованному имени с возвратом идентификатора связанных с ней текстовых фрагментов.

Для поиска по отношению между двумя сущностями использовался запрос вида (рис. 3):

```
MATCH (s1:Entity {normalized_name: $source})-[:MENTIONED_IN]->(c:Chunk)
MATCH (s2)-[:MENTIONED_IN]->(c:Chunk)
MATCH (s2)-[:MENTIONED_IN]->(s1)
RETURN DISTINCT c.id AS chunk_id
```

Рис. 3. Запрос сопоставления двух сущностей из триплета с возвратом идентификатора связанных с ними текстовых фрагментов.

Такой запрос находит фрагменты, в которых совместно встречаются две связанные сущности, и особенно полезен для вопросов, ориентированных на связи между объектами предметной области.

Стоимость и время построения индексов

Для оценки вычислительных затрат были сопоставлены два способа построения индекса на выборке из 64 фрагментов, агрегированных из публичных Telegram-каналов. Построение векторного индекса с использованием модели Embeddings-2 (длина вектора 1024) потребовало 5962 токена и заняло 0,89 секунды при стоимости 0,08 рубля [13]. Построение графа знаний с использованием модели GigaChat 2 Max на том же объеме данных потребовало существенно больших ресурсов: от 27739 до 28024 реальных токенов в зависимости от режима запуска, время индексирования составило 94,03 секунды при использовании кэша и 96,24 секунды без него. При тарифе 0,65 рубля за тысячу токенов стоимость построения графа превышает стоимость векторного индексирования в 85 раз. Разница в числе тарифицируемых токенов между моделью создания векторов и LLM-моделью с кэшем составила 4471 токен (табл. 1), что обусловлено структурной разметкой фрагментов в индексующем промпте.

Таблица 1

Сравнительная таблица по затраченным токенам для двух подходов

Метод	Токены (всего)	Токены (тарифицируемые)	Стоимость, ₽	Время, с
Embeddings	5 962	5 962	0,08	0,89
Graph (без кэша)	28 024	12 879	8,37	96,24
Graph (с кэшем)	27 739	10 433	6,78	94,03

В рамках исследования были сопоставлены три стратегии построения графа (рис. 4): без батчинга и кэша системного промпта; с батчингом по 8 фрагментов без явного кэша; с батчингом по 8 фрагментов и явным управлением кэшем через идентификатор сессии [14]. Первая стратегия демонстрировала значительный разброс в расходе токенов, обусловленный стохастическим поведением кэша на стороне провайдера. На 40-ом шаге видно самоочистку, которая приводила к резкому скачку затрат. Вторая стратегия обеспечила более стабильный расход.

Комбинация батчинга и явного управления кэшем оказалась наиболее экономичной и стабильной: при 50 фрагментах экономия по токенам относительно базового подхода составила около 17%, а время обработки сократилось примерно на 20%.

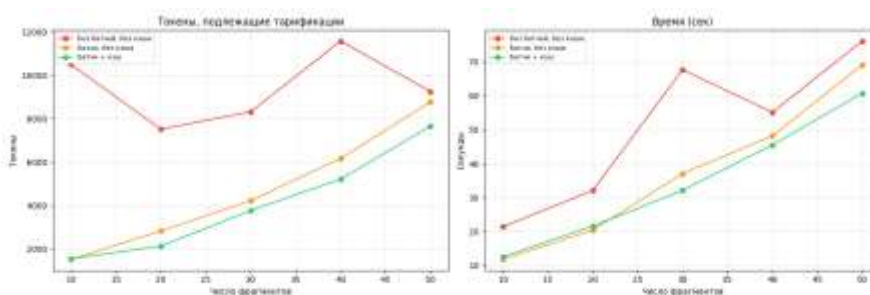


Рис. 4 – Три стратегии построения графа знаний

Сравнение качества ответов

Для оценки качества поиска использовалась библиотека RAGAS [15]. Граф знаний строился на корпусе из 300 фрагментов с использованием той же модели GigaChat 2 Max; для гибридного поиска применялась комбинация pgvector [8] (косинусное сходство, порог 0,7, топ-5) и полнотекстового поиска BM25 через механизм websearch_to_tsquery [9]. Оба метода работали на одной и той же выборке из 300 фрагментов. Для оценки было сформировано 7 вопросов (табл. 3).

В качестве поиска связей внутри графа использовались 5 типов запросов к Neo4j в зависимости от полноты триплета, возвращаемого поисковым промптом: 1) поиск фрагмента по одной сущности; 2) поиск фрагмента по двум сущностям; 3) поиск фрагмента по сущности и предикату в прямом направлении; 4) поиск фрагмента по сущности и предикату в обратном направлении; 5) поиск фрагмента по полному триплету [7]. Приоритет фрагментов после запросов: $5 > (4,3) > 2 > 1$.

Различия между подходами по обеим метрикам незначительны (табл. 2), однако качественный анализ ответов выявляет характерные паттерны превосходства каждого из методов.

Таблица 2

Сравнительная таблица двух подходов по встроенным метрикам RAGAS

Метрика	Graph RAG	Гибридный поиск	Δ
Faithfulness (Достоверность)	0,908	0,905	0,003
Answer Relevancy (Релевантность ответа)	0,674	0,685	-0,011

Графовый поиск демонстрирует преимущество на вопросах, предполагающих явные связи между сущностями. На вопрос «С кем конкурирует DeepSeek?» граф возвращает точный контекст через ребро COMPETES_WITH и даёт однозначный ответ. На вопрос о партнёрах и создателях Palantir граф извлекает полный набор связей (CREATED_BY, PARTNERED_WITH). На вопрос об Agent Payments Protocol граф точно перечисляет всех партнёров и совместимые фреймворки через рёбра PARTNERED_WITH и COMPATIBLE_WITH. Показательно и поведение при отсутствии релевантного контекста: на вопрос о влиянии ИИ на занятость граф честно сообщает об отсутствии информации – в отличие от гибридного поиска, который возвращает тематически близкие, но не отвечающие на вопрос фрагменты.

Гибридный поиск превосходит графовый на вопросах широкого семантического охвата, не привязанных к конкретным именованным сущностям. На вопрос о влиянии генеративного ИИ на занятость гибридный поиск находит релевантный фрагмент с конкретными данными исследования (снижение доли джуниоров на 7,7%), тогда как граф не находит ничего – поскольку в графе отсутствует соответствующая связь между сущностями. На вопрос о связи математики с гуманитарными науками оба метода находят одинаковый базовый фрагмент, однако гибридный поиск дополнительно подтягивает контекст через BM25.

Отдельного внимания заслуживает вопрос о сотрудниках IBM: ни один из методов не даёт корректного ответа о публикациях, поскольку соответствующей информации нет в корпусе. Граф возвращает только связи WORKS_FOR, гибридный поиск – нерелевантные фрагменты. Это наглядно иллюстрирует общее ограничение обоих подходов: качество ответа не может превышать качество исходного корпуса.

Таблица 3

Сравнительная таблица вопросов и ответов для двух подходов

Вопрос	Graph RAG (Ответ)	Гибридный поиск (RAG+BM25) (Ответ)
С кем конкурирует DeepSeek?	DeepSeek конкурирует с ChatGPT.	Из предоставленного контекста нельзя однозначно определить...
Как генеративный ИИ влияет на занятость сотрудников?	В предоставленном контексте отсутствует информация...	...оказывает негативное влияние на занятость младших сотрудников... снижение на 7.7% спустя шесть кварталов.
Как математика связана с гуманитарными науками?	Развернутый ответ со списком связей (культура, дисциплина мышления, мост между науками).	Развернутый ответ с цитированием аргументов о психологическом развитии и семантике.
С кем сотрудничает Palantir и кто его создал?	Основан Александром Карпом и Питером Тилем... Сотрудничала с ЦРУ.	Создана Карпом и Тилем... Сотрудничает с ЦРУ... (примечание про Mastercard относится к другому проекту).
Кто из сотрудников IBM публиковал исследования и в каких изданиях?	Нет информации о публикациях.. (найлены только сотрудники).	Нет ответа в представленном контексте. (найлены только сотрудники).
Какие платежные системы партнёрятся с Agent Payments Protocol и с какими фреймворками он совместим?	Списки: Партнёры (Mastercard, PayPal), Фреймворки (MCP, A2A).	Списки: Партнёры (Mastercard, PayPal, Intuit, Salesforce), Фреймворки (MCP, A2A).
Какое китайское оборудование связано с передачей данных, и кто из известных личностей выступает против Китая?	Оборудование: Unitree G1... Личности: Замиска, Карп.	Оборудование: Unitree G1... Информация о личностях отсутствует.

Заключение

В настоящей работе граф знаний рассмотрен как способ динамического расширения контекста больших языковых моделей. Показано, что качество графовой базы определяется согласованностью словарей, нормализацией сущностей и валидацией извлечённых триплетов. Сравнительный эксперимент на корпусе из 300 фрагментов с использованием RAGAS показал, что графовый и гибридный поиск демонстрируют сопоставимые результаты по метрикам достоверности и релевантности, тогда как качественные различия проявляются в типе запросов: граф лучше справляется с вопросами на связи между сущностями, а гибридный поиск – с более общими семантическими запросами. При этом построение графа требует существенно больших вычислительных и токеновых затрат, хотя батчинг и управление кэшем частично их снижают. В результате граф знаний целесообразно рассматривать не как замену

гибридному поиску, а как его структурное дополнение для предметных областей, где критичны отношения между сущностями.

References

1. Barnett S., Kurniawan S., Thudumu S., Brannelly Z., Abdelrazek M. Seven Failure Points When Engineering a Retrieval Augmented Generation System // arXiv preprint arXiv:2401.05856v1 [cs.SE]. – 2024. – URL: <https://arxiv.org/html/2401.05856v1> (дата обращения: 18.03.2026).
2. Lù X.H. BM25S: Orders of magnitude faster lexical search via eager sparse scoring // arXiv preprint arXiv:2407.03618. – 2024. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2407.03618> (дата обращения: 18.03.2026).
3. Sultania D., Lu Z., Naik T. et al. Domain-specific Question Answering with Hybrid Search // arXiv preprint arXiv:2412.03736v2. – 2024. – URL: <https://arxiv.org/html/2412.03736v2> (дата обращения: 19.03.2026).
4. Hogan A., Blomqvist E., Cochez M. et al. Knowledge Graphs // arXiv preprint arXiv:2003.02320. – 2021. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2003.02320> (дата обращения: 15.03.2026).
5. Wesslund D., Stenström V., Linde P., Holmberg A. LLM-based Triplet Extraction from Financial Reports // arXiv preprint arXiv:2602.11886v1. – 2026. – URL: <https://arxiv.org/html/2602.11886v1> (дата обращения: 23.03.2026).
6. Richardeau G., Chali S., Le Merrer E., Penzo C., Tredan G. LLMs Prompted for Graphs: Hallucinations and Generative Capabilities // arXiv preprint arXiv:2409.00159v3. – 2025. – URL: <https://arxiv.org/html/2409.00159v3> (дата обращения: 23.03.2026).
7. Tang L., Dou W., Zheng Y. et al. Proving Cypher Query Equivalence // arXiv preprint arXiv:2504.15742. – 2025. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2504.15742> (дата обращения: 24.03.2026).
8. pgvector: Open-source vector similarity search for Postgres [Электронный ресурс] // GitHub. – URL: <https://github.com/pgvector/pgvector> (дата обращения: 24.03.2026).
9. PostgreSQL Documentation: Parsing Queries [Электронный ресурс] // PostgreSQL. – URL: <https://www.postgresql.org/docs/current/textsearch-controls.html> (дата обращения: 24.03.2026).
10. Pan H., Zhang Q., Adamu M., Dragut E.C., Latecki L.J. Taxonomy-Driven Knowledge Graph Construction for Domain-Specific Scientific Applications // Findings of the

Association for Computational Linguistics: ACL 2025. – 2025. – URL: <https://aclanthology.org/2025.findings-acl.223.pdf> (дата обращения: 10.03.2026).

11. Zhang J. Entity Normalization in Knowledge Graphs: Solving the Fragmentation Problem [Электронный ресурс] // LinkedIn. – 2026. – URL: https://www.linkedin.com/posts/jzhang-ai_how-knowledge-graphs-are-really-built-8-activity-7420133178490662912-SuCz (дата обращения: 15.03.2026).

12. Cypher Manual v5.15: Introduction to Cypher [Электронный ресурс] // Neo4j Documentation. – URL: <https://neo4j.com/docs/cypher-manual/current/introduction/cypher-neo4j/> (дата обращения: 18.03.2026).

13. Тарифы GigaChat [Электронный ресурс] // СберДевелоперс. – URL: <https://developers.sber.ru/docs/ru/gigachat/tariffs/legal-tariffs> (дата обращения: 20.03.2026).

14. Кеширование запросов [Электронный ресурс] // СберДевелоперс. – URL: <https://developers.sber.ru/docs/ru/gigachat/guides/keeping-context> (дата обращения: 25.03.2026).

15. RAGAS: Retrieval Augmented Generation Assessment [Электронный ресурс] // RAGAS Documentation. – URL: <https://docs.ragas.io/en/stable/> (дата обращения: 25.03.2026).

UDC 355.469.34:528.44(470)

Tsekoeva F.K., Pantiuchov A.V. Features of the use of unmanned aerial vehicles in cadastral activities in the Russian Federation

Особенности применения беспилотных летательных аппаратов в кадастровой деятельности на территории Российской Федерации

Tsekoeva Fatima Kaspolovna,

Candidate of agricultural sciences, Director of the scientific and educational center "Land management, cadastre and land monitoring", the head of educational programs of the direction "Land management and cadastres", Immanuel Kant Baltic Federal University

Pantiuchov Aleksandr Vladimirovich,

master's student in the field of «Land management and cadastres», Immanuel Kant Baltic Federal University, engineer of category I in the department of comprehensive cadastral works of federal significance at the Branch of PPK "Roskadast" in the Kaliningrad Oblast

Цекоева Фатима Касполовна,

к.с.-х., доцент, Директор НОЦ "Землеустройство, кадастры и мониторинг земель", руководитель образовательных программ направления "Землеустройство и кадастры, ФГАОУ ВО Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта

Пантюхов Александр Владимирович,

магистрант направления подготовки «Землеустройство и кадастры», ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», инженер I категории отдела выполнения комплексных кадастровых работ федерального значения Филиала ППК «Роскадастр» по Калининградской области

Abstract. This article examines current issues related to the integration of unmanned aerial vehicles (UAVs) into cadastral work in Russia. It analyzes the technical advantages of using aerial photography compared to traditional ground-based geodetic survey methods. Particular attention is paid to the legal and regulatory framework for UAV flights and the accuracy requirements for data entry into the Unified State Register of Real Estate (USRRE). The key challenges and development prospects in this area are identified.

Keywords: UAVs, cadastral activities, land surveying, photogrammetry, orthophotomap, Unified State Register of Real Estate, remote sensing of the earth.

Аннотация. В статье рассматриваются актуальные вопросы интеграции беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в сферу кадастровых работ в России. Анализируются технические преимущества использования аэрофотосъемки по сравнению с традиционными наземными методами геодезических измерений. Особое внимание уделено нормативно-правовому регулированию полетов БПЛА и требованиям к точности получаемых данных для внесения сведений в Единый государственный реестр недвижимости (ЕГРН). Выявлены основные проблемы и перспективы развития данного направления.

Ключевые слова: БПЛА, кадастровая деятельность, межевание, фотограмметрия, ортофотоплан, ЕГРН, дистанционное зондирование земли.

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент.

Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Введение

Современный этап развития земельно-имущественных отношений в Российской Федерации требует высокой скорости и точности сбора пространственных данных. Традиционные методы кадастровой съемки, такие как использование электронных

тахеометров и спутниковой геодезической аппаратуры (GNSS-приемников), несмотря на их высокую точность, зачастую оказываются трудозатратными и малоэффективными при работе на больших площадях или в труднодоступной местности.

В последние годы в практику кадастровых инженеров активно внедряются беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Применение технологий аэрофотосъемки с использованием беспилотных систем позволяет существенно оптимизировать процесс инвентаризации земель, уточнения границ земельных участков и постановки объектов капитального строительства на кадастровый учет.

Технико-технологические аспекты применения БПЛА

Для целей кадастра применяются БПЛА двух основных типов: самолетного (крылатого) и мультироторного типа. Выбор типа аппарата зависит от площади объекта работ. Для линейных объектов и крупных массивов сельхозугодий эффективнее использовать БПЛА самолетного типа, в то время как для плотной городской застройки или отдельных садовых товариществ (СНТ) предпочтительнее мультироторы благодаря их маневренности и возможности зависания в точке.

Основным результатом обработки данных с БПЛА является ортофотоплан — фотографический план местности, избавленный от искажений, вызванных рельефом и центральным проектированием. Точность определения координат характерных точек границ объектов недвижимости при использовании БПЛА зависит от:

1. Разрешения камеры (GSD — Ground Sample Distance).
2. Наличия на борту GNSS RTK/ППК модулей.
3. Количества и качества размещения наземных контрольных точек (опознаков).

Согласно требованиям Приказа Росреестра от 23.10.2020 № П/0393, средняя квадратическая погрешность (СКП) определения координат характерных точек для земель населенных пунктов не должна превышать 0,1 метра. Для достижения таких показателей при использовании БПЛА необходимо соблюдение строгих регламентов камеральной обработки в специализированном ПО (например, Agisoft Metashape, Pix4Dmapper).

Нормативно-правовое регулирование в РФ

Применение БПЛА в кадастровой деятельности ограничено жесткими рамками законодательства РФ. Основными нормативными актами являются:

- Воздушный кодекс Российской Федерации.
- Постановление Правительства РФ от 03.02.2020 № 74 (о правилах регистрации БПЛА).
- Федеральные правила использования воздушного пространства.

Для проведения кадастровых работ с применением БПЛА кадастровый инженер или организация должны пройти процедуру постановки аппарата на учет в Росавиации. Одной из специфических особенностей РФ является необходимость получения

разрешения на проведение аэрофотосъемки от оперативных органов Генерального штаба Вооруженных Сил РФ и территориальных органов ФСБ. После выполнения работ полученные материалы (снимки) должны пройти процедуру контрольного просмотра (рассекречивания) на предмет отсутствия на них режимных объектов.

Преимущества и недостатки метода

Применение БПЛА в кадастре имеет ряд неоспоримых преимуществ:

- Высокая производительность: съемка 100 га территории может занять менее одного часа, что в десятки раз быстрее наземных методов.
- Наглядность и информативность: ортофотоплан позволяет увидеть не только границы, но и фактическое использование земель, наличие самозахватов, состояние объектов.
- Доступность: возможность получения данных о территориях со сложным рельефом, заболоченных участках или объектах с ограниченным доступом.

Однако существуют и сдерживающие факторы:

1. Метеозависимость: невозможность проведения работ при сильном ветре, осадках или низкой облачности.
2. Растительный покров: плотная крона деревьев может скрывать границы заборов или углы зданий, что требует дополнительного наземного дообследования.
3. Юридическая сложность: длительный процесс согласования полетов в зонах с ограничениями (NFZ).

Методика проведения кадастровых работ с применением БПЛА

Процесс выполнения работ можно разделить на четыре этапа

1. Подготовительный: изучение технического задания, получение разрешений на использование воздушного пространства, проектирование полетного задания.
 2. Полевой: закладка наземных опознаков, определение их координат геодезическими методами, запуск БПЛА и выполнение съемки.
 3. Камеральный: фотограмметрическая обработка снимков, построение плотного облака точек, создание цифровой модели рельефа (ЦМР) и ортофотоплана.
 4. Кадастровый: дешифрирование снимков, определение координат характерных точек границ, подготовка межевого или технического плана.
- Для оценки точности используется формула средней квадратической погрешности:

$$M_t = \sqrt{(m_0^2 + m_s^2)}$$

где m_0 — погрешность определения координат опорных точек, m_s — погрешность фотограмметрических построений.

Проблемы интеграции данных в ЕГРН

Одной из проблем остается вопрос признания данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) в качестве первичных доказательств при земельных спорах в судах. Несмотря на то что современные БПЛА обеспечивают субсантиметровую точность, в некоторых регионах сохраняется консервативный подход проверяющих органов Росреестра, требующих дублирования измерений наземными методами.

Также актуальной проблемой является «наследование» ошибок кадастровых карт. При наложении точного ортофотоплана на существующую кадастровую карту часто выявляются массовые смещения границ (реестровые ошибки), возникшие из-за использования старых систем координат, или некачественных измерений прошлых лет. БПЛА в данном случае выступает инструментом выявления таких ошибок, но их исправление требует сложной юридической процедуры.

Заключение

Применение беспилотных летательных аппаратов является одним из наиболее перспективных направлений развития кадастровой деятельности в РФ. Использование БПЛА позволяет не только снизить себестоимость работ, но и повысить качество наполнения ЕГРН достоверными сведениями.

Для дальнейшего внедрения технологии необходимо упрощение процедур получения разрешений на полеты для нужд геодезии и картографии, а также совершенствование методической базы Росреестра в части автоматизированного распознавания границ объектов недвижимости по данным аэрофотосъемки. В перспективе использование БПЛА в сочетании с алгоритмами искусственного интеллекта позволит перейти к модели «цифрового кадастра», обновляемого в режиме реального времени.

References

1. Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 № 136-ФЗ.
2. Федеральный закон «О государственной регистрации недвижимости» от 13.07.2015 № 218-ФЗ.
3. Аврунев Е. И., Гиниятов И. А. О совершенствовании технологии ведения государственного кадастра недвижимости // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2.
4. Капица И. А. Применение БПЛА при выполнении кадастровых работ // Геопрофи. – 2021. – № 4.
5. Чибуничев А. Г. Фотограмметрия: учебник. – М.: МИИГАиК, 2016.

UDC 528.44(470.26)

Tsekoeva F.K., Semenova D.V. Comprehensive cadastral works as an effective mechanism for the implementation of the "complete and accurate registry" project of the national spatial data system (using the Kaliningrad region as an example)

Комплексные кадастровые работы как действенный механизм реализации проекта «полный и точный реестр» национальной системы пространственных данных (на примере Калининградской области)

Tsekoeva Fatima Kaspolovna,

Candidate of agricultural sciences, Director of the scientific and educational center "Land management, cadastre and land monitoring", the head of educational programs of the direction "Land management and cadastres", Immanuel Kant Baltic Federal University

Semenova Darya Vladimirovna

Student of the direction "Land management and cadastres" of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "I. Kant Baltic Federal University"

Цекоева Фатима Касполовна,
к.с.-х., доцент, Директор НОЦ "Землеустройство, кадастры и мониторинг земель",
руководитель образовательных программ направления "Землеустройство и кадастры, ФГАОУ
ВО Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта
Семёнова Дарья Владимировна
Студентка направления «Землеустройство и кадастры» ФГАОУ ВО «Балтийского
федерального университета им. И. Канта»

Abstract. *The current issues related to the implementation of complex cadastral works, the choice of cadastral quarters for the KKR, improving the quality and efficiency of the KKR are considered, and on October 29, 2024, the President of the Russian Federation signed Federal Law No. 371-FZ "On Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation", which The procedure for conducting the KKR is being clarified.*

Keywords: *complex cadastral works, land plots, cadastral quarter, effectiveness of complex cadastral works.*

Аннотация. *Рассматриваются актуальные вопросы, связанные с проведением комплексных кадастровых работ, выбор кадастровых кварталов для ККР, повышение качества и эффективности выполнения ККР, а также 29 октября 2024 года Президент РФ подписал Федеральный закон №371-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», которым уточняется порядок проведения ККР.*

Ключевые слова: *комплексные кадастровые работы, земельные участки, кадастровый квартал, эффективность комплексных кадастровых работ.*

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

Цель работы – выявить эффективность комплексных кадастровых работ.

Материалы и методика исследования. Для начала рассмотрим нормативно-правовую базу. Комплексные кадастровые работы (ККР) регулируются главой 4.1. Комплексные кадастровые работы № 221-ФЗ от 24.07.2007 «О кадастровой деятельности».

Комплексные кадастровые работы – это такие кадастровые работы, которые выполняются одновременно в отношении всех расположенных на территории одного кадастрового квартала или территориях нескольких смежных кадастровых кварталов:

1) земельных участков (Далее - ЗУ), сведения Единого государственного реестра недвижимости (далее – ЕГРН), о которых не соответствуют установленным требованиям к описанию местоположения границ ЗУ;

2) ЗУ, образование которых предусмотрено документами, указанными в части 6 вышеуказанной главы:

3) ЗУ, занятые площадями, улицами, проездами, набережными, скверами, бульварами, водными объектами общего пользования и другими объектами (территориями) общего пользования, и ЗУ, на которых расположены многоквартирные дома (МКД). ККР выполняются, если образование таких ЗУ предусмотрено утвержденным в порядке, установленном законодательством о градостроительной деятельности, проектом межевания территории;

4) ЗУ, подлежащие образованию в счет долей в праве общей собственности на ЗУ сельскохозяйственного назначения. ККР выполняются только в случае, если образование таких ЗУ предусмотрено проектом межевания ЗУ, утвержденным в порядке, установленном Федеральным законом от 24.07.2002 года N 101-ФЗ "Об обороте земель сельскохозяйственного назначения";

5) ЗУ, расположенные в границах территории ведения гражданами садоводства или огородничества для собственных нужд. Здесь ККР выполняются в соответствии с утвержденным проектом межевания территории либо в случае, если применительно к такой территории утвержден проект организации и застройки территории;

Лесные участки. ККР выполняются только в случае, если образование таких лесных участков предусмотрено утвержденной в порядке, установленном лесным законодательством, проектной документацией лесных участков.

6) зданий, сооружений (за исключением линейных объектов), а также объектов незавершенного строительства (ОНС), сведения о которых содержатся в ЕГРН.

Прежде всего отметим, что проводятся такие работы для уточнения местоположения границ ЗУ, для установления или уточнения местоположения на ЗУ вышеуказанных зданий, сооружений, ОНС, обеспечивается образование ЗУ общего пользования, занятых в том числе улицами, набережными, скверами, для корректного выделения ЗУ, на которых расположены здания, в том числе МКД, а также ККР проводятся с целью исправления реестровых ошибок в сведениях о местоположении границ объектов недвижимости, которые уже имеются в ЕГРН. [1]

Цели ККР

1. Уточнение местоположения границ ЗУ и ОКС.
2. Образование новых ЗУ.
3. Исправление реестровых ошибок.
4. Выявление правообладателей ранее учтенных ОН, самовольного захвата ЗУ и самовольных построек.

Социальное значение

1. Освобождение правообладателей от оплаты кадастровых работ.
2. Снижение земельных споров, включая освобождение правообладателей от судебных расходов.

Экономический эффект

1. Увеличение исчисленного удельного земельного налога.
2. Повышение инвестиционной привлекательности территорий.
3. Формирование эффективной градостроительной и земельной политики.
4. Выявление самовольного захвата ЗУ и самовольных построек

Объекты ККР

Комплексные кадастровые работы выполняются одновременно в
отношении всех объектов, расположенных на территории одного или нескольких
смежных кадастровых кварталов.



Рис. 1. До проведения ККР



Рис. 2. После проведения ККР

Комплексные кадастровые работы (далее ККР), в чем заключается отличие от обычных кадастровых работ.

Если обычные кадастровые работы проводятся в отношении одного земельного участка, то под комплексными кадастровыми работами понимаются кадастровые работы, которые выполняются одновременно в отношении всех земельных участков, расположенных на территории одного кадастрового квартала или нескольких смежных кадастровых кварталов. [4]

ККР проводятся для уточнения местоположения границ земельных участков, для установления или уточнения местоположения на земельных участках зданий, сооружений, объектов незавершенного строительства. Так первые комплексные кадастровые работы в России были проведены в 2015 г. после введения в действие регламентирующей главы 4.1 Закона № 221-ФЗ*

В целях повышения качества и эффективности выполнения ККР, а также минимизации случаев, связанных со значительным расхождением прогнозных значений количества объектов недвижимости, расположенных в кадастровом квартале, с фактическим значением объектов недвижимости, включенных в КПТР, исполнительным органам субъекта Российской Федерации, органам местного самоуправления, совместно с территориальными органами Росреестра необходимо учитывать, что:

1. Определяющими критериями при выборе кадастровых кварталов, планируемых к ККР, являются социально-экономическая целесообразность, наличие наибольшего

количества земельных участков без границ и объектов капитального строительства без привязки к земельным участкам, наличие массовых реестровых ошибок в местоположении границ объектов недвижимости, наличие утвержденных документов для образования новых земельных участков, предусмотренных частью 6 статьи 42.1 Закона N 221-ФЗ.[6]

2.В отношении выбранных кадастровых кварталов необходимо обеспечить проведение подготовительных мероприятий на предмет исключения из кадастровых кварталов объектов недвижимости.

3.Достижению результатов использования субсидий способствует заключение контрактов на выполнение ККР, в том числе на образующуюся в ходе закупок экономию, суммарное количество объектов недвижимости которых будет выше плановых значений.

4.Одним из ключевых факторов высокорезультативных ККР является организация продуктивного взаимодействия между заказчиком, исполнителем, исполнительными органами субъектов Российской Федерации, органами местного самоуправления, территориальным органом Росреестра по вопросам, возникающим в ходе проведения работ, в том числе в части оказания содействия исполнителю в получении необходимых документов.

5.При определении исполнителя ККР использовать конкурсные процедуры, включающие требования к наличию оборудования, квалификации и опыту исполнителя, или заключать контракты с единственным исполнителем (при наличии такой возможности).

Президент РФ подписал Федеральный закон от 29.10.2024 № 371-ФЗ "О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации", которым уточняется порядок проведения комплексных кадастровых работ (ККР).

ККР предусматривают кадастровый учет и/или уточнение сведений обо всех объектах недвижимости, находящихся как минимум в пределах одного кадастрового квартала. Приблизительно - это от одной до нескольких сотен земельных участков. Результатом ККР является разработка карты-плана территории, на которую помещены объекты недвижимости кадастрового квартала. Технология выполнения ККР не предусматривает индивидуальное согласование границ земельных участков и объектов капитального строительства (ОКС). Карта-план территории принимается согласительной комиссией, включающей разработчика, представителя муниципальных и региональных властей, Росреестра, саморегулируемой организации исполнителя ККР и других заинтересованных лиц. Вероятно, это дает существенную экономию времени и средств на выполнение кадастровых работ.

В соответствии с новым законом ККР по источникам финансирования подразделяются на работы федерального, регионального и местного значения.

Предусматривается, что ККР федерального значения будут выполняться исключительно Публично-правовой компании (ПКК) "Роскадастр", за счет средств субсидий, выделяемых по соглашению между Росреестром и ПКК «Роскадастр». При этом закон не отменяет необходимости проведения процедур, предусмотренных Федеральным законом от 05.04.2013 г. № 44-ФЗ «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд» в отношении ККР регионального и местного значения.

Выделение субсидий на ККР регионам с 2025 г. прекращается, как не показавшее эффективность и качество работ.

Данным законом определяется, что упомянутое соглашение будет содержать в том числе перечень кадастровых кварталов, на территориях которых предусматривается выполнение ККР федерального значения. Перечень таких кадастровых кварталов подготавливается Росреестром на основании предложений (заявок) органов государственной власти субъектов Российской Федерации и предложений ПКК "Роскадастр". Порядок и критерии определения перечня кадастровых кварталов, на территориях которых предусматривается выполнение ККР федерального значения, устанавливаются Правительством РФ.

Исходя из Письма Росреестра от 02.02.2024 г. N 18-0862-ТГ/24 можно полагать, что при формировании перечня кадастровых кварталов для ККР федерального значения приоритет будет отдаваться кадастровым кварталам, в которых:

а) наибольшее количество земельных участков без границ и объектов капитального строительства (ОКС) без привязки к земельным участкам.

б) массовые реестровые ошибки в местоположении границ объектов недвижимости, т.е. неверно установленные границы участков и ОКСов.

в) наличие утвержденных документов для образования новых земельных участков, предусмотренных частью 6 статьи 42.1 Закона N 221-ФЗ от 24.07.2007 г. «О кадастровой деятельности», т.е.- для земельных участков, в отношении территории которых утвержден проект межевания территории или иная проектная документация. [6]

Кроме того, федеральным законом уточняется, что в результате выполнения комплексных кадастровых работ обеспечивается образование, в том числе земельных участков общего назначения в границах садоводств (СНТ), гаражных кооперативов и под многоквартирными домами.

Новым законом устанавливается обязанность Росреестра в десятидневный срок со дня внесения в ЕГРН сведений и (или) осуществления государственного учета на

основании карты-плана территории по размещению в личном кабинете кадастрового инженера, подготовившего карту-план территории, и направлению правообладателям объектов недвижимости уведомлений о внесении (или невнесении) в ЕГРН сведений об изменении характеристик объектов недвижимости.

Заключение. Проведение комплексных кадастровых работ способствует решению ряда задач, в том числе по исправлению реестровых ошибок в сведениях ЕГРН, устранению причин невозможности внесения сведений, содержащих описание местоположения границ территориальных зон, населенных пунктов, приведение в соответствие данных ЕГРН и фактической ситуации на местности.

Путем проведения ККР, в отношении объектов недвижимости, границы которых не были установлены в соответствии с требованиями действующего законодательства, будут проведены кадастровые работы за счет средств регионального и местного бюджетов. Иными словами, собственнику не придется оплачивать услуги кадастрового инженера.

Однозначно, Администрациям важно организовать информационное взаимодействие с гражданами. Собственники должны знать и понимать, как проведение ККР повлияет на их недвижимость.

References

1. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 29.12.2022) // Система «КонсультантПлюс» [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/
2. Налоговый кодекс Российской Федерации часть вторая от 05.08.2000 № 117-ФЗ (ред. от 11.10.2022) // Система «КонсультантПлюс» [Электрон. ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_28165
3. Федеральный закон «О внесении изменений в Федеральный закон «О государственном кадастре недвижимости» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 22.12.2014 № 447-ФЗ (ред. от 03.07.2016) // Система «КонсультантПлюс» [Электронный ресурс]. https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_172518/
4. Федеральный закон «О государственной регистрации недвижимости» от 13.07.2015 № 218-ФЗ (ред. от 18.03.2023) // Система «КонсультантПлюс» [Электронный ресурс]. https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW
5. Федеральный закон от 18.06.2001 N 78-ФЗ (ред. от 30.12.2021) «О

землеустройстве» // Система «КонсультантПлюс» [Электронный ресурс]. URL:
https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_32132/

6.Федеральный закон «О кадастровой деятельности» от 24.07.2007 № 221-ФЗ (ред.
от 19.12.2022) // Система «КонсультантПлюс»
[Электронныйресурс].URL:https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_70088/

7.Федеральный закон от 06.12.2021 № 390-ФЗ «О федеральном бюджете на 2022
год и на плановый период 2023 и 2024 годов» // Система
«КонсультантПлюс»[Электронныйресурс].https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_402647/.

SPACE TECHNOLOGY AND ENGINEERING

UDC 621.396.946

Lyakhov A.V., Kasyanenko N.G. Evaluation of power secrecy of a satellite communication system using computer modeling

Оценка энергетической скрытности системы спутниковой связи при помощи компьютерного моделирования

Lyakhov Alexey Vladimirovich,

Ph.D. of Engineering Sciences. Associate Professor at the Department of Computational Mathematics and Cybernetics of the North Caucasus Federal University. Stavropol.

Kasyanenko Natalia Georgievna,

Ph.D. of Engineering Sciences, Docent. Associate Professor at the Department of Information Technology of the RTU MIREA branch. Stavropol.

Ляхов Алексей Владимирович,

кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной математики и кибернетики Северо-Кавказского федерального университета, г. Ставрополь

Касьяненко Наталья Георгиевна,

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий филиала РТУ МИРЭА, г. Ставрополь.

Abstract. *The purpose of this article is to demonstrate the feasibility of simultaneously ensuring not only the required noise immunity but also the energy stealth of satellite communication systems with a reduced carrier frequency in the 30 to 100 MHz range from signal detection when the radio detection receiver is located close to the satellite earth station receiver in dual reception. The main results of the study are presented in the form of data obtained during a computational experiment in MATLAB to estimate the energy stealth coefficient of the satellite communication system, as well as the coefficient and radius of spatial correlation of signals received by the antennas. This publication differs from others similar in this topic in that, for the first time, the energy stealth coefficient of a satellite communication system in dual reception has been estimated taking into account the possibility of fast correlated fading in the radio detection and reception channels according to the generalized Rayleigh law (Rice's law). The application of these results relates to the validation of initial data required for calculations to validate the parameters of advanced satellite communication systems using spatially diverse reception on two antennas, taking into account their simultaneous compliance with both noise immunity and communication security requirements. The obtained results may be of interest to researchers and applicants conducting research in the field of satellite communications.*

Keywords: *satellite communication system, low-frequency satellite communication systems, spatially diverse reception on two antennas, generalized Rayleigh fading, Rician fading, numerical methods, energy secrecy coefficient, spatial correlation coefficient of signals, spatial correlation radius of signals.*

Аннотация. *Цель статьи – показать возможность одновременного обеспечения не только требуемой помехоустойчивости, но и энергетической скрытности спутниковых систем связи с пониженной несущей частотой в диапазоне от 30 до 100 МГц от обнаружения сигналов при близком размещении приемника радиообнаружения к приемнику земной станции спутниковой связи при сдвоенном приеме. Основные результаты исследования представлены в виде данных, полученных в ходе вычислительного эксперимента в MATLAB по оценке коэффициента энергетической скрытности спутниковой системы связи, а также коэффициента и радиуса пространственной корреляции сигналов, принятых антеннами. Отличие данной публикации от других, схожих по теме заключается в том, что впервые оценка коэффициента энергетической скрытности спутниковой системы связи при сдвоенном приеме выполнена с учетом возможности возникновения в каналах радиообнаружения и приема*

быстрых коррелированных замираний по обобщенному релеевскому закону (закону Райса). Область применения результатов связана с обоснованием исходных данных, необходимых для проведения расчетов по обоснованию параметров перспективных спутниковых систем связи, использующих пространственно-разнесенный прием на две антенны, с учетом одновременного обеспечения ими требований как по помехоустойчивости, так и по скрытности связи. Полученные результаты могут представлять интерес для научных работников и соискателей, ведущих научные исследования в области спутниковой связи.

Ключевые слова: *спутниковая система связи, низкочастотные системы спутниковой связи, пространственно-разнесенный прием на две антенны, обобщенные релеевские замирания, райсовские замирания, численные методы, коэффициент энергетической скрытности, коэффициент пространственной корреляции сигналов, радиус пространственной корреляции сигналов.*

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

Введение

В настоящее время спутниковые системы связи (ССС) обеспечивают основные каналы радиосвязи применительно к стратегическому звену государственного управления. Именно эти ССС обеспечивают связь с удаленными пунктами органов государственной власти, дипломатическими представительствами Российской Федерации в других странах, передачу команд боевого управления подразделениям силовых и специальных ведомств, дислоцированных за рубежом. Поэтому к таким ССС предъявляются повышенные требования по безопасности, помехоустойчивости и скрытности.

Традиционно под *скрытностью* радиоэлектронного устройства понимают его способность противостоять мерам радиоразведки, при этом энергетическая скрытность характеризует способность противостоять мерам, направленным на обнаружение сигнала разведывательным приемным устройством [1].

Известен способ обеспечения энергетической скрытности ССС от обнаружения сигналов при близком (на удалении не более 10 км) размещении приемника (ПРМ) радиообнаружения средства радио- и радиотехнической разведки (РРТР) к ПРМ земной станции спутниковой связи (ЗсСС) [2]. Однако этот способ предполагает: 1) отказ от использования в радиолинии «вниз» «искусственный спутник Земли (ИСЗ)-ЗсСС» традиционных несущих частот $f_0 = 1...10$ ГГц и переход на частоты $f_0 = 30...100$ МГц, именуемые пониженными несущими частотами (ПНЧ); 2) использование в ЗсСС пространственно-разнесенного приема на четыре приемные антенны. Последнее обстоятельство является существенным ограничивающим фактором внедрения известного способа [2], т. к. расстояние d между соседними антеннами при их линейном эквидистантном разнесении может достигать сотен и даже тысячи метров, а общие размеры такой приемной антенной системы (АС) – нескольких километров. В этой связи большой интерес представляет случай использования в ЗсСС пространственно-

разнесенного приема на две приемные антенны. Кроме того, известный способ [2] не учитывает возможность возникновения в каналах радиобнаружения и приема быстрых коррелированных обобщенных релейевских (райсовских) замираний принимаемых сигналов.

Целью статьи является показать возможность одновременного обеспечения требуемой помехоустойчивости и энергетической скрытности ССС при близком размещении ПРМ радиобнаружения средства РРТР к ПРМ ЗсСС в диапазоне ПНЧ $f_0 = 30...100$ МГц при пространственно-разнесенном приеме на две приемные антенны и наличии коррелированных замираний по обобщенному релейевскому закону (закону Райса) в каналах радиобнаружения и приема.

Возникновение таких замираний обусловлено известными [3] особенностями распространения радиоволн (РРВ) диапазона частот от 30 до 100 МГц в ионосфере, заключающимися в том, что в нормальной ионосфере электронная концентрация (ЭК) $N_i = \bar{N} + \Delta N_i$ содержит флуктуации ΔN_i относительно среднего (фонового) значения \bar{N} (рисунок 1).

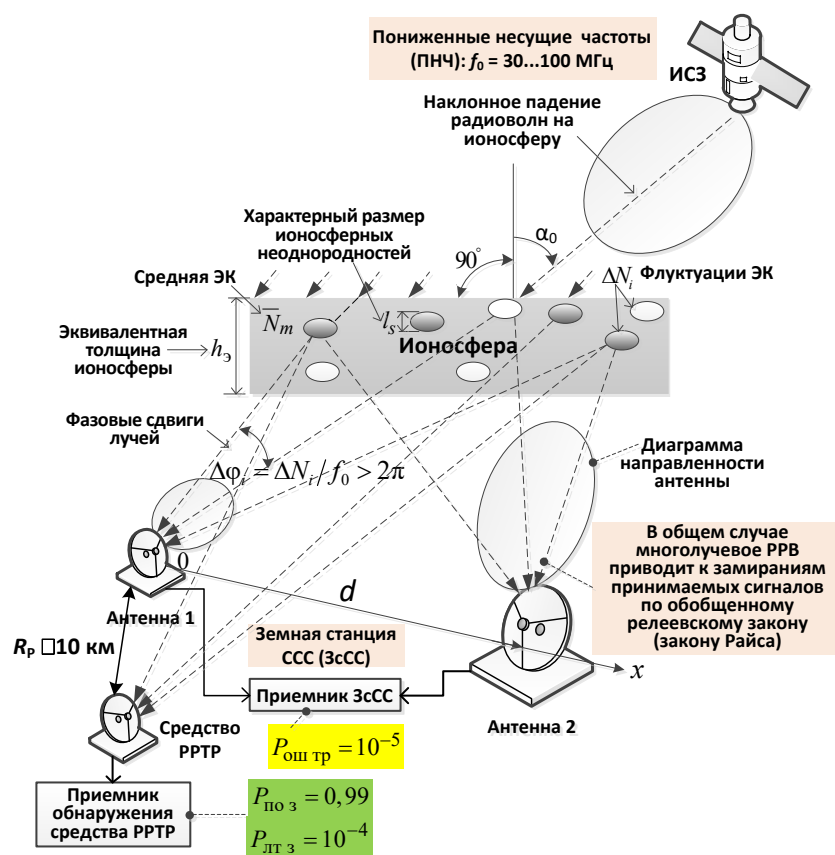


Рисунок 1 – Модель размещения передатчика и приемника спутниковой радиосвязи с пониженной несущей частотой при близком размещении приемника радиобнаружения и пространственно-разнесенного приема на две антенны

Вследствие этого, при транссионосферном РРВ с ПНЧ до $f_0 = 30 \dots 100$ МГц через неоднородную ионосферу к ПРМ ЗсСС приходит множество ($i = 1 \dots M$) рассеянных неоднородностями ЭК (ΔN_i) лучей с относительными фазовыми сдвигами $\Delta \varphi_i \sim \Delta N_i / f_0$. Значения фазовых сдвигов $\Delta \varphi_i$ определяют условия возникновения интерференционных быстрых замираний по обобщенному релейскому закону (закону Райса) ($0 < \Delta \varphi_i \leq 2\pi$) или релейского ($\Delta \varphi_i \gg 2\pi$) типа, причем райсовские замирания могут быть произвольной глубины. При традиционно используемых в ССС несущих частотах $f_0 = 1 \dots 10$ ГГц относительные фазовые сдвиги лучей отсутствуют (т.к. $\Delta \varphi_i \sim \Delta N_i / f_0 = 0$), поэтому интерференционные быстрые замирания принимаемых сигналов не возникают.

Глубину райсовских замираний принимаемых сигналов принято количественно оценивать при помощи параметра Райса γ^2 , который определяется как отношение мощности регулярной (не случайной) составляющей принимаемого P_p сигнала к мощности флуктуационной (случайной) $P_{фл}$ составляющей $\gamma^2 = P_p / P_{фл}$ [4]. Таким образом, параметр Райса может принимать произвольные значения $0 \leq \gamma^2 \leq \infty$. Причем параметр Райса равен нулю ($\gamma^2 = 0$) при релейских замираниях. Если же замирания принимаемых сигналов отсутствуют ($P_{фл} = 0$), то параметр Райса становится равным бесконечности ($\gamma^2 = \infty$).

С целью компенсации отрицательных эффектов, возникающих при приеме сигналов с быстрыми замираниями в ЗсСС в рамках известного способа повышения энергетической скрытности ССС [2] предлагается использовать пространственно-разнесенный прием сигналов на четыре антенны. Реализовать тот же самый подход в ПРМ радиообнаружения невозможно по причине ограничений на массогабаритные характеристики средства РРТР. Поэтому в ПРМ радиообнаружения вынужденно используется прием на одну антенну.

В статье [2] количественная оценка энергетической скрытности ССС применительно к радиолинии «вниз» «ИСЗ-ЗсСС», с учетом близкого (на удалении не более 10 км) размещения ПРМ радиообнаружения средства РРТР, производилась путем вычисления коэффициента энергетической скрытности (КЭС) $\gamma_{эс}$ по формуле:

$$\gamma_{эс} = h_{рз}^2 / h_{трn}^2 \text{ или } (\gamma_{эс})_{дБ} = (h_{рз}^2)_{дБ} - (h_{трn}^2)_{дБ}, \quad (1)$$

где: $h_{рз}^2$ – энергетическое отношение сигнал-шум (ОСШ) на входе ПРМ радиобнаружения средства РРТР, определяемое из условия достижения заданной вероятности правильного обнаружения $P_{поз} = 0,99$ сигнала ССС при заданной вероятности ложной тревоги $P_{лтз} = 10^{-4}$; $h_{трn}^2$ – энергетическое ОСШ на входе ПРМ ЗсСС, использующего пространственно-разнесенный прием сигналов на n антенн ($n = 4$), необходимое для обеспечения требуемой вероятности ошибки приема бита информации $P_{оштр} = 10^{-5}$. При этом условие обеспечения энергетической скрытности ССС записывается в виде:

$$\gamma_{эс} = h_{рз}^2 / h_{трn}^2 \geq 1 \text{ или } (\gamma_{эс})_{дБ} = (h_{рз}^2)_{дБ} - (h_{трn}^2)_{дБ} \geq 0. \quad (2)$$

Результаты, представленные в статье, основаны на исследованиях авторов, которые были опубликованы в журнальных статьях только частично [5].

1. Постановка задачи

Дано: С геостационарного ИСЗ, излучается простой сигнал на несущей частоте, принадлежащей диапазону ПНЧ $f_0 \in 30 \dots 100$ МГц (рисунок 1).

Угол α трансионосферного РРВ относительно вертикали (зенитный угол) составляет 65° .

ПРМ радиобнаружения средства РРТР расположен на одной высоте при малом удалении $R_p \leq 10$ км от ПРМ ЗсСС.

В ПРМ радиобнаружения реализована схема оптимальной некогерентной (НК) обработки сигналов с флуктуирующей начальной фазой. Заданные значения вероятности правильного обнаружения $P_{по}$ сигнала ССС и ложной тревоги $P_{лт}$ равны $P_{поз} = 0,99$, $P_{лтз} = 10^{-4}$. При этом вероятность правильного обнаружения сигнала ССС определяется уравнением обнаружения [6]:

$$P_{по} = Q \left[g_1(h^2, \gamma^2), h_{01}(h^2, \gamma^2, P_{лт}) \right], \quad (3)$$

где $Q(g_1, h_{01})$ – функция Маркума от аргументов

$g_1(h^2, \gamma^2) = \left[2h^2\gamma^2 / (1 + \gamma^2 + h^2) \right]^{1/2}$ и

$h_{01}(h^2, \gamma^2, P_{\text{ПТ}}) = \left[2 \ln(P_{\text{ПТ}}^{-1}) (1 + \gamma^2) / (1 + \gamma^2 + h^2) \right]^{1/2}$, которые должны быть неотрицательными вещественными числами ($g_1, h_{01} \geq 0$); γ^2 – параметр Райса; h^2 – энергетическое ОСШ на входе ПРМ радиобнаружения средства РРТР.

Используемая в формуле (3) функция Маркума определяется выражением:

$$Q(g_1, h_{01}) = \int_{h_{01}}^{\infty} x \exp\left[-(x^2 + g_1^2)/2\right] I_0(g_1 x) dx,$$

где $I_0(g_1 x)$ обозначает модифицированную функцию Бесселя первого рода нулевого порядка. Зависимость между параметром Райса γ^2 и среднеквадратическим отклонением (СКО) фазового фронта волны σ_φ (радианы) в радиоканале с транссионосферным распространением радиоволн описывается выражениями вида [7]:

$$\gamma^2 = P_p / P_{\text{фл}} = 1 / [\exp(\sigma_\varphi^2) - 1], \quad (4)$$

$$\sigma_\varphi \approx \sqrt[4]{\pi} (80,8 \pi / c) \sqrt{l_s h_\varnothing \sec \alpha} (\sigma_{\Delta N} / f_0). \quad (5)$$

В формуле (5) использованы следующие обозначения: $c = 3 \cdot 10^8$ – скорость света, м/с; $l_s \approx 400$ – характерный размер ионосферных неоднородностей, м; $h_\varnothing \approx 2,5 \cdot 10^5$ – эквивалентная толщина ионосферы, м, со средней ЭК, равной ее максимальному значению $\bar{N}(h_m) = \bar{N}_m = (2 \dots 4) \cdot 10^{12}$, эл/м³; $\bar{N}(h_m) = \bar{N}_m$ – максимальная средняя ЭК в слое F ионосферы (на высоте $h = h_m$ максимума ионизации), эл/м³; $\sigma_{\Delta N} = (2 \dots 4) \cdot 10^9$ – СКО флуктуаций ЭК в неоднородностях ионосферы, эл/м³; α – угол транссионосферного распространения радиоволн относительно вертикали (зенитный угол), градусы; f_0 – несущая частота, Гц.

Требуемая вероятность ошибки приема бита информации в приемнике ЗсСС составляет $P_{\text{ош тр}} = 10^{-5}$. В ПРМ ЗсСС используется пространственно-разнесенный НК прием сигналов на две антенны при наличии коррелированных замираний принимаемых сигналов по обобщенному релеевскому закону (закону Райса).

Коэффициент пространственной корреляции сигналов, принятых антеннами, разнесенными на расстояние d , м, определяется соотношением [8]:

$$R = \exp\left[-(d/d_{cor})^2\right], \quad (6)$$

где d_{cor} – радиус корреляции принимаемых сигналов, м, вычисляемый по формуле:

$$d_{cor} = l_s / \sigma_\varphi = l_s / \left[\sqrt[4]{\pi} (80,8\pi/c) \sqrt{l_s h_3 \sec \alpha} (\sigma_{\Delta N} / f_0) \right]. \quad (7)$$

Из выражений (6) и (7) следует, что принятые антеннами сигналы будут некоррелированными, если антенны разнести в пространстве на расстояние $d \geq 2d_{cor}$, конечно, при условии, что антенны не имеют электромагнитного взаимодействия. В противном случае принятые сигналы могут быть коррелированы из-за электромагнитного взаимодействия антенн.

Функциональная зависимость вероятности ошибки приема бита информации в ПРМ ЗсСС при пространственно-разнесенном НК приеме сигналов на две антенны с квадратичным сложением в статистически однородных каналах приема при наличии коррелированных замираний по обобщенному релейскому закону (закону Райса) определяется уравнением помехоустойчивости [9]:

$$P_{\text{ош}}(2) = \frac{2(1+\gamma^2)^2}{h^4(1-R^2)+4h^2(1+\gamma^2)+4(1+\gamma^2)^2} \exp\left[-\frac{2\gamma^2 h^2}{h^2(1+R)+2(1+\gamma^2)}\right] +$$

$$+ \frac{h^2[h^2(1-R^2)+2(1+\gamma^2)](1+\gamma^2)^2}{[h^4(1-R^2)+4h^2(1+\gamma^2)+4(1+\gamma^2)^2]^2} \times$$

$$\times \exp\left\{-\frac{2\gamma^2}{1+R} + \frac{2\gamma^2(1+\gamma^2)}{[h^2(1-R^2)+2(1+\gamma^2)](1+R)^2} + \right. \quad (8)$$

$$\left. + \frac{2\gamma^2(1+\gamma^2)(1-R^2)[h^2(1+R)+2(1+\gamma^2)]^2}{[h^2(1-R^2)+2(1+\gamma^2)][h^4(1-R^2)+4h^2(1+\gamma^2)+4(1+\gamma^2)^2](1+R)^2}\right\} \times$$

$$\times \left\{1 + \frac{2\gamma^2(1+\gamma^2)(1-R^2)[h^2(1+R)+2(1+\gamma^2)]^2}{[h^2(1-R^2)+2(1+\gamma^2)][h^4(1-R^2)+4h^2(1+\gamma^2)+4(1+\gamma^2)^2](1+R)^2}\right\},$$

где h^2 – значение среднестатистического энергетического ОСШ в ветвях пространственного разнесения антенн; γ^2 – параметр Райса, вычисляемый по формуле (4).

Требуется:

1. Определить, расстояние d , на которое следует разнести приемные антенны, чтобы принятые ими сигналы были некоррелированными при условии, что ПНЧ f_0 принимает значения 30 и 100 МГц.

2. По результатам выполнения пункта 1 определить и построить графики КЭС ССС при изменении значения несущей частоты f_0 от 30 до 100 МГц, для случаев, когда расстояние d между двумя приемными антеннами соответствует требованию отсутствию корреляции принимаемых сигналов на частотах 30 и 100 МГц.

3. По результатам выполнения пунктов 1 и 2 оценить и проанализировать возможность обеспечения энергетической скрытности ССС в диапазоне частот $f_0 = 30 \dots 100$ МГц при пространственно-разнесенном НК приеме сигналов на две антенны ($n = 2$) и наличии коррелированных замираний принимаемых сигналов по обобщенному релеевскому закону (закону Райса).

2. Результаты вычислительного эксперимента и их анализ

2.1. Определение расстояния, на которое следует разнести приемные антенны, чтобы принятые ими сигналы были некоррелированными

Результаты вычислений коэффициента пространственной корреляции сигналов, принятых антеннами, разнесенными на расстояние $d \in 0 \dots 1600$ м, для несущих частот 30 и 100 МГц, выполненные в MATLAB по формулам (6) и (7), показаны на рисунке 2. Для определения расстояния d , на которое следует разнести приемные антенны, чтобы принятые ими сигналы были некоррелированными, на рисунке 2 проведена пунктирная линия постоянного уровня $R = 0,36788$, соответствующая убыванию коэффициента пространственной корреляции принимаемых сигналов в e раз, где e – основание натурального алгоритма ($e = 2,71828182$).

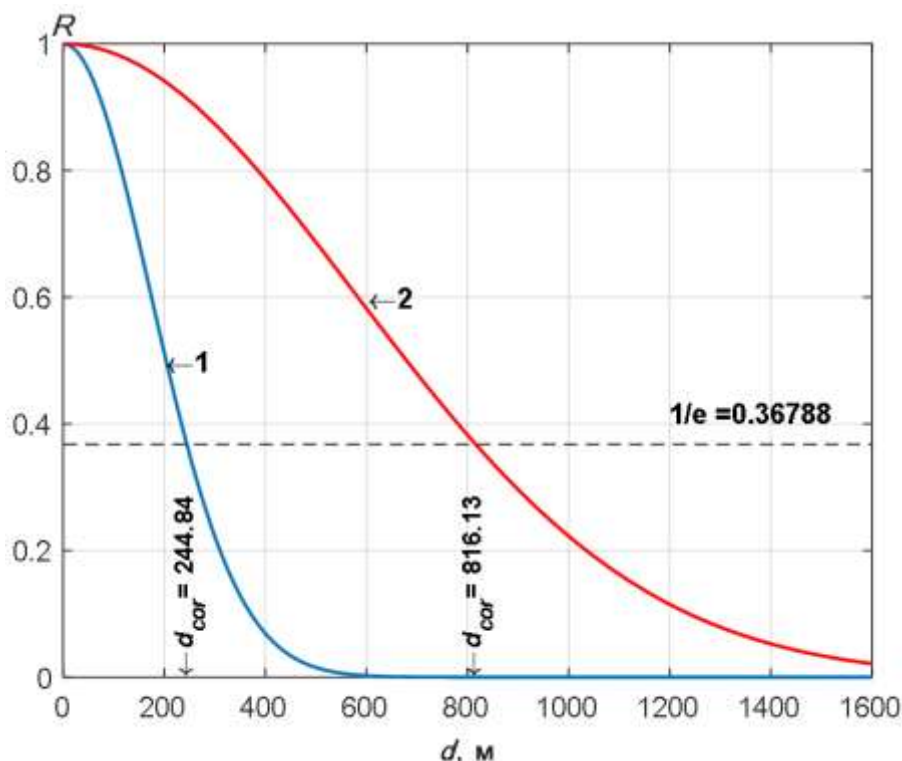


Рисунок 2 – Графики коэффициента пространственной корреляции сигналов при пространственно-разнесенного приема на две антенны, в зависимости от расстояния между ними, для несущих частот: 1) $f_0 = 30$ МГц; 2) $f_0 = 100$ МГц

Проекция точек пересечения линии постоянного уровня $R = 0,36788$ с графиками изменения коэффициента пространственной корреляции сигналов для несущих частот 30 и 100 МГц на ось абсцисс позволяют определить радиус корреляции принимаемых сигналов:

$$d_{cor} = \begin{cases} 244,84 \text{ м, если } f_0 = 30 \text{ МГц;} \\ 816,13 \text{ м, если } f_0 = 100 \text{ МГц.} \end{cases} \quad (9)$$

С учетом неравенства $d \geq 2d_{cor}$ и найденных радиусов корреляции принимаемых сигналов (9), выберем расстояние их пространственного разнеса $d = 800, 1200$ и 1600 м.

Вычисленные и построенные в MATLAB графики зависимости КЭС ССС $\gamma_{эс}(f_0)$, показаны на рисунке 3.

Примечание – В процессе вычислительного эксперимента в MATLAB нахождение параметров $h_{рз}^2$ и $h_{тр2}^2$, необходимых для определения КЭС ($\gamma_{эс}$) по формуле (1), было

реализовано с использованием численных методов уточнения корней нелинейных уравнений обнаружения (3) и помехоустойчивости (8), рассмотренных в статье [5].

На рисунке 3 видно, что при пространственно-разнесенном приеме на две приемные антенны и наличии коррелированных замираний по обобщенному релейевскому закону (закону Райса) условие (2) обеспечения энергетической скрытности ССС выполняется во всем диапазоне ПНЧ $f_0 \in 30 \dots 100$ МГц, если расстояние d между антеннами составляет 1200 и 1600 м.

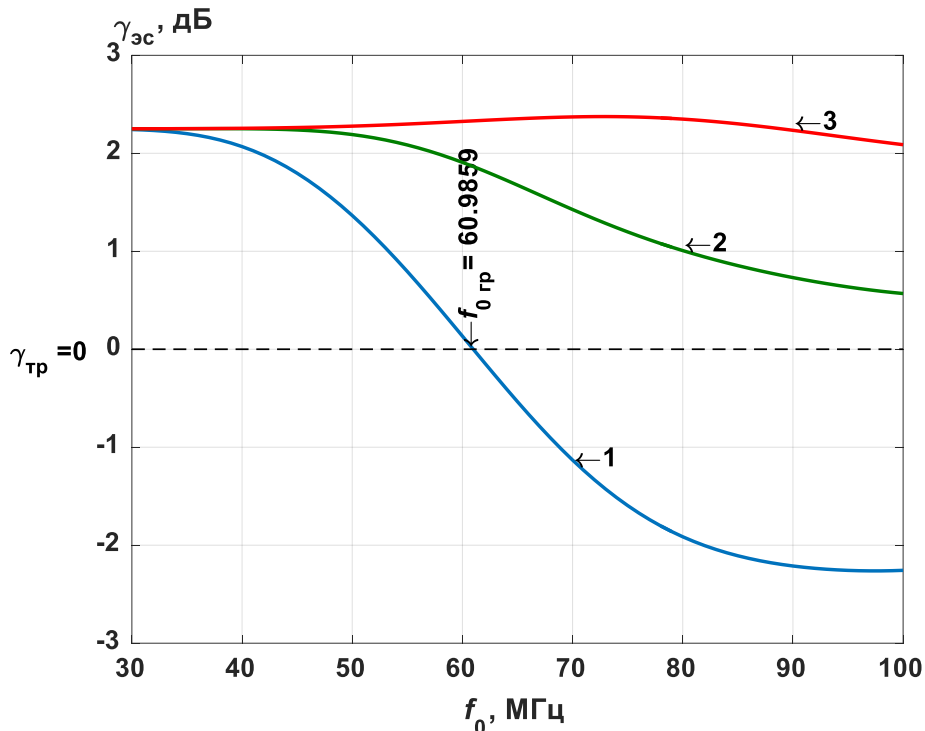


Рисунок 3 – Графики зависимости коэффициента энергетической скрытности спутниковой системы связи с пониженной несущей частотой для случаев пространственно-разнесенного приема сигналов на две антенны, когда расстояние между ними принимает значения: 1) $d = 800$ м; 2) $d = 1200$ м; 3) $d = 1600$ м

Если же расстояние между антеннами $d = 800$ м, то условие (2) обеспечения энергетической скрытности ССС выполняется только в ограниченном интервале частот от 30 МГц и до граничной частоты $f_{0 \text{ гр}} = 60,9859$ МГц, выше которой энергетическая скрытность ССС уже не обеспечивается. При этом для частот выше граничной частоты $f_{0 \text{ гр}} = 60,9859$ МГц происходит заметное уменьшение КЭС до уровня менее -2 дБ, достигаемого на частоте 100 МГц.

Кроме того, на рисунке 3 видно, что если расстояние d между приемными антеннами составляет 1200 и 1600 м, то, по мере увеличения значения несущей частоты от 30 до 100 МГц, КЭС ССС только увеличивается, достигая при этом на частоте 100 МГц уровня более 2 дБ.

Для того чтобы проанализировать причины такого изменения КЭС ССС, на рисунке 4 показаны графики, иллюстрирующие изменение параметров h_{p3}^2 и h_{tp2}^2 , необходимых для определения КЭС ($\gamma_{эс}$) по формуле (1), когда расстояние d между приемными антеннами составляет 800, 1200 и 1600 м.

Из анализа графиков на рисунке 4 можно сделать следующие выводы:

– графики параметров h_{p3}^2 и h_{tp2}^2 при изменении частоты от 30 до 100 МГц, при пространственном разноразе приемных антенн $d = 800$ м, пересекаются на частоте $f_{0 гр} = 60,9859$ МГц. Причем, левее этой частоты график параметра h_{p3}^2 находится выше графика параметра h_{tp2}^2 , а правее нее, наоборот, график параметра h_{p3}^2 находится ниже графика параметра h_{tp2}^2 . Поэтому на частотах менее $f_{0 гр} = 60,9859$ МГц КЭС больше нуля и, в соответствии с критерием (2), энергетическая скрытность ССС в этом случае обеспечивается. На частоте $f_{0 гр} = 60,9859$ МГц и более значение КЭС ССС не превышает ноль в логарифмических единицах измерения. Поэтому в соответствии с критерием (2), энергетическая скрытность ССС на частотах выше $f_{0 гр} = 60,9859$ МГц уже не обеспечивается;

– при изменении значения несущей частоты от 30 до 100 МГц графики параметров h_{p3}^2 и h_{tp2}^2 при пространственном разноразе приемных антенн на расстояние 1200 и 1600 м не пересекаются. Причем в этих случаях график параметра h_{p3}^2 находится заметно выше графиков параметра h_{tp2}^2 . Поэтому при пространственном разноразе приемных антенн на расстояние не менее 1200 м энергетическая скрытность ССС, в соответствии с критерием (2), обеспечивается уже во всем диапазоне пониженных несущих частот, т. е. $f_0 \in 30...100$ МГц.

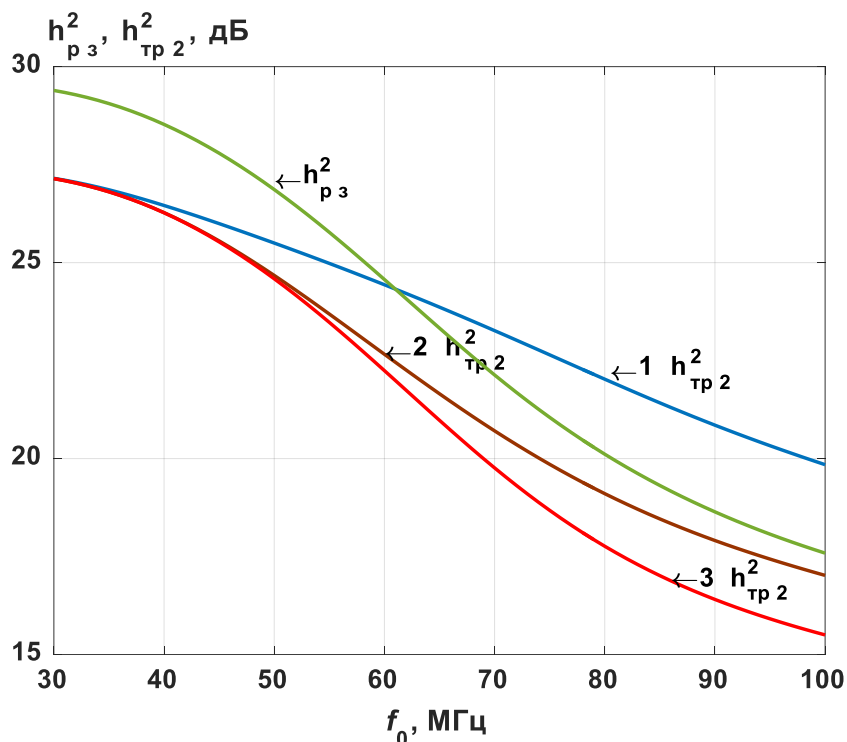


Рисунок 4 – Графики зависимости от частоты параметров h_{p3}^2 и h_{tr2}^2 для случаев пространственно-разнесенного приема сигналов на две антенны, когда расстояние между ними принимает значения: 1) $d = 800$ м; 2) $d = 1200$ м; 3) $d = 1600$ м

Выводы

Таким образом, анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Оценка энергетической скрытности ССС показала, что при использовании в ССС пониженных несущих частот $f_0 = 30 \dots 100$ МГц даже при близком размещении ПРМ радиобнаружения средства РПТР к ПРМ ЗсСС и наличии коррелированных замираний по обобщенному релейскому закону (закону Райса), можно обеспечить, наряду с требуемой помехоустойчивостью, достижение требуемой энергетической скрытности ССС на уровне не менее 2 дБ во всем диапазоне пониженных несущих частот, т. е. $f_0 \in 30 \dots 100$ МГц, при пространственно-разнесенном приеме на две антенны, если расстояние между ними составляет не менее 1200 м.

2. Если расстояние между двумя приемными антеннами ЗсСС составляет менее 1200 м, то в этом случае для обеспечения энергетической скрытности ССС на уровне не хуже требуемого ($\gamma_{эс тр} \geq 0$ дБ), возникает проблема выбора несущей частоты из

определенного поддиапазона частот ($f_0 \in 30...60,9859$ МГц для разнесения антенн на 800 м), которая не имеет однозначного решения.

References

1. Тузов Г. И, Сивов В. А., Прытков В. И., Урядников Ю. Ф., Дергачев Ю. А., Сулиманов А. А. Помехозащищенность систем со сложными сигналами. – М.: Сов. радио, 1985. – 264 с.
2. Чипига А. Ф. Анализ энергетической скрытности низкочастотных систем спутниковой связи от обнаружения сигналов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 2. – С. 209-216.
3. Чипига А. Ф., Сенокосова А. В. Защита информации в системах космической связи за счет изменения условий распространения радиоволн // Космические исследования. 2007. Т. 45. № 1. – С. 59-66.
4. Кириллов Н. Е. Помехоустойчивая передача сообщений по линейным каналам со случайно изменяющимися параметрами. М.: Связь. 1971. – 256 с.
5. Ляхов, А. В. Определение зависимости коэффициента энергетической скрытности систем спутниковой связи при обнаружении сигналов от выбора рабочей частоты на основе численных методов решения нелинейных уравнений/ А.В. Ляхов // Современная наука и инновации, № 1 (17), 2017, с. 42-49.
6. Ляхов, А. В. Методика оценки вероятности правильного обнаружения сигналов с райсовскими замираниями / А. В. Ляхов, В. П. Пашинцев, А. Д. Белов и др. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, №3 (7) 2012, 2012, с. 21-26.
7. Пашинцев В. П., Солчатов М. Э., Гахов Р. П. Влияние ионосферы на характеристики космических систем передачи информации (монография) / В.П. Пашинцев, М. Э. Солчатов, Р. П. Гахов. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2006. – 191 с.
8. Буга Н. Н. Основы теории связи и передачи данных. Часть 2. – Л.: ЛВКИА, 1970. – 707 с.
9. Андронов И. С., Финк Л. М. Передача дискретных сообщений по параллельным каналам. – М.: Сов. радио, 1971. – 408 с.

STANDARDIZATION AND QUALITY

UDC 004.62

Kutsenko A. Architecture of a Prototype Lossless Hyperspectral Data Compressor

Архитектура прототипа компрессора гиперспектральных данных без потерь

Kutsenko Alexander

Bauman Moscow State Technical University, Russia, Moscow

Куценко Александр Алексеевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», РФ, г. Москва

Abstract. *The architecture of a lossless hyperspectral data compressor prototype is considered. Static and block-adaptive variants of the encoder organization scheme are proposed. The principle of operation and the output file format are defined for the block-adaptive compressor. The compressor performance results on real data demonstrated a compression ratio close to the Shannon limit.*

Keywords: *hyperspectral data; lossless compression; tANS encoding; block-adaptive compressor.*

Аннотация. *Рассмотрена архитектура прототипа компрессора гиперспектральных данных без потерь. Предложен статический и блочно-адаптивный варианты схемы организации кодировщика. Для блочно-адаптивного компрессора указан принцип работы и формат выходного файла. Результаты работы компрессора на реальных данных показали степень сжатия, близкую к пределу Шеннона.*

Ключевые слова: *гиперспектральные данные; сжатие без потерь; tANS кодирование; блочно-адаптивный компрессор.*

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

Гиперспектральные изображения характеризуются большим количеством спектральных каналов (сотни и тысячи) по сравнению с классическими RGB изображениями. По этой причине становится актуальной задача сжатия таких изображений. Изображение получается в результате работы прибора интерферометра, каждый его отсчет называют интерферограммой. Каждая интерферограмма представляет собой массив чисел, отвечающих за спектральные каналы в нем. Визуально один пиксель (интерферограмма) такого изображения показан на рисунке 1.

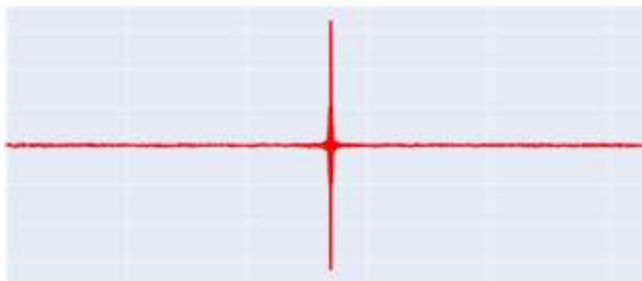


Рисунок 1. Графическое изображение одной интерферограммы

В имеющемся наборе данных, каждая интерферограмма состоит из 26000 отсчетов в формате S16_LE, то есть целое 16-битное число со знаком. Каждая интерферограмма имеет характерный всплеск значений примерно по середине каждого отсчета, а также шумоподобные области значений слева и справа от этого пика.

Для сжатия подобных отсчетов можно использовать энтропийные методы сжатия такие, как коды Хаффмана, арифметическое кодирование, или ANS методы [1]. Наиболее перспективным является использование ANS методов, поскольку они сочетают в себе эффективность арифметического кодирования вместе со скоростью работы кодов Хаффмана. При этом ANS методы строятся на основе целочисленной арифметики, благодаря чему могут быть использованы в том числе во встраиваемых системах [2].

В качестве энтропийного кодировщика будем использовать tANS компрессор. Выбор этого метода обусловлен тем, что в нем весь процесс кодирования описывается таблицей переходов состояний, которую можно составить один раз в начале работы, дальнейшее кодирование ограничено только скоростью доступа к памяти. Результат применения tANS метода без дополнительной обработки данных показан на рисунке 2.

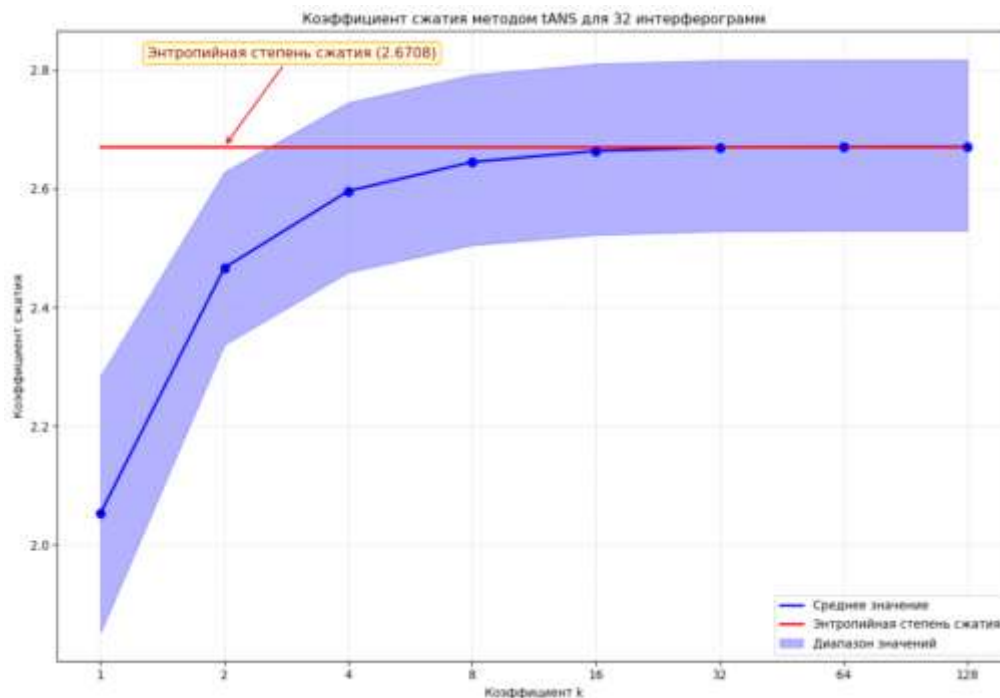


Рисунок 2. Сжатие методом tANS на исходных данных

Коэффициент k задает размер таблицы кодирования, кратный числу символов алфавита в нем. Красной линией показан энтропийный предел по Шеннону. Видно, что при $k=8$ метод показывает коэффициент сжатия, близкий к пределу. Однако в данном случае алфавит был индивидуальным для каждой интерферограммы, чего в общем случае допускать нельзя. В данном эксперименте в одном снимке встречалось 400-500 уникальных значений. Поскольку диапазон значений является 2^{16} , то размер базовой таблицы также должен быть равен 2^{16} . При $k > 1$ ее размеркратно увеличится в k раз [3], поэтому необходимо преобразование данных.

Заметим, что диапазон значений интерферограммы на рисунке 1 содержит большое количество околонулевых значений. Тогда можно разделить исходный поток с помощью метода разделения мантисс и экспонент на два потока: поток старших r битов и поток младших $16 - r$ битов. Для того чтобы обеспечить большое количество нулевых значений, можно применить зигзаг кодирование – это окажет положительное влияние на степень сжатия tANS методом впоследствии [4]. Последовательность обработки в таком случае показана на рисунке 3.

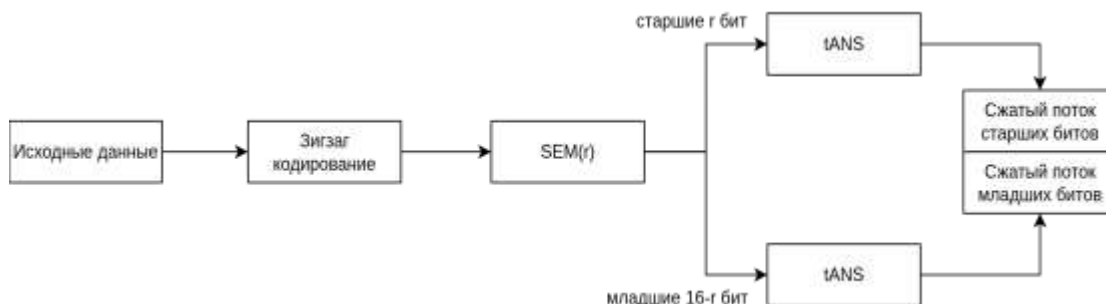


Рисунок 3. Схема обработки данных в компрессоре гиперспектральных изображений

Исходные целочисленные данные со знаком преобразуются с помощью зигзаг кодирования в беззнаковый тип. Далее происходит разделение потока на два с помощью метода разделения мантисс и экспонент (SEM). Получившиеся потоки отдельно сжимаются tANS компрессорами, а сжатый поток от каждого из них записывается в выходной поток.

Возможно две организации кодировщика: статическая и блочно-адаптивная. Статическая реализация требует двойного прохода по данным: первый раз для накопления статистики для tANS компрессоров, второй – для сжатия. Такой подход помимо этого требует выделение памяти под буфер размера входного изображения, по этой причине расходы по памяти высоки. Однако tANS компрессор в таком случае кодирует максимально эффективно за счет знания статистики распределения входных данных.

Блочно-адаптивная реализация предполагает итеративную обработку входной последовательности блоками определенного размера. В таком случае после чтения каждого блока происходит накопление статистики по текущему и предыдущему блоку (в начале статистика инициализируется некоторым заранее известным образом), кодирование блока, и чтение следующего блока до тех пор, пока не закончатся данные для кодирования. В таком случае есть следующие параметры кодировщика: k_1, k_2 – кратность таблиц для старших и младших потоков, bs – размер блока в отсчетах, r – граница разделения старших битов от младших. Формат файла показан на рисунке 4.

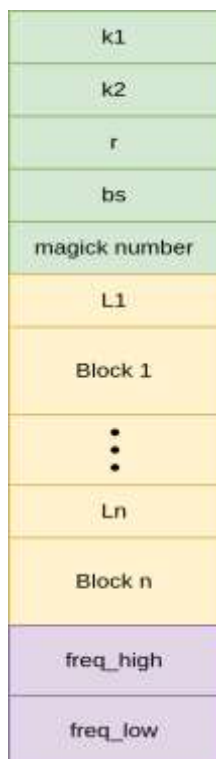


Рисунок 4. Структура сжатого файла кодировщиком гиперспектральных изображений

Для записи блока используется префиксная запись: сначала указывается его длина в битах, затем записывается поток закодированных битов.

Схема работы блочно-адаптивного компрессора показана на рисунке 5. По мере чтения входного потока, компрессор накапливает статистику по прочитанным символам. Исходный поток с помощью SEM метода, который реализует функция `split_uint16_kbits`, разделяется на два потока. Поток старших битов содержит r -битовые элементы, младших битов — $16-r$ -битовые элементы. Отсюда следует, что в старших битах может встретиться 2^r различных значений, а в младших — 2^{16-r} . Поэтому зарезервируем массивы `freq_high` и `freq_low` таких размеров для подсчета статистики.

Далее компрессор выделяет память под хранение блока: `high_block` для старших битов, `low_block` — для младших, а также обновляется статистика обработанных символов в `freq_high` и `freq_low`. После чего выполняется итеративное чтение входного файла до тех пор, пока не будет достигнут конец файла. После прочтения каждого символа, увеличивается счетчик `count`, зигзаг кодирование отсчета и разделение его на старшие и младшие биты. Результат разделения записывается в два потока: `high_block`, `low_block`. Стоит отметить, что при $r = 8$ элементы `high_block` и `low_block` являются 8-

битными, в противном случае — 16-битными. При достижении счетчиком count значения bs, происходит кодирование очередного блока данных. Для этого вызывается функция do_encode. После завершения чтения файла, в буфере могут остаться данные, которые еще не были закодированы, поэтому в конце так же вызывается do_encode сначала для кодирования старших битов high_block, затем – младших битов low_block.

Функция do_encode выполняет кодирование блока данных. Сумма частот статистики символов масштабируется до $k_1 \cdot 2^r$ для старших битов и до $k_2 \cdot 2^{16-r}$ для младших битов. После чего создается и инициализируется структура кодировщика. Результат работы кодировщика записывается в динамический массив. После обработки блока, вычисляется длина в битах закодированной последовательности. Длина блока записывается в выходной файл, после него записывается сама закодированная последовательность. Если число закодированных бит не кратно байтам, то используется дополнение незначащими нулями до целого числа байт.

По результатам тестирования, прототип блочно-адаптивного компрессора показал степень среднюю сжатия для набора из 32 интерферограмм на уровне 2.45 при $k_1=k_2=8$ и размере блока 1024 отсчетов. При увеличении k и размера блоков можно достичь степень сжатия, получаемой статическим вариантом компрессора, однако расходы памяти кратно увеличатся.

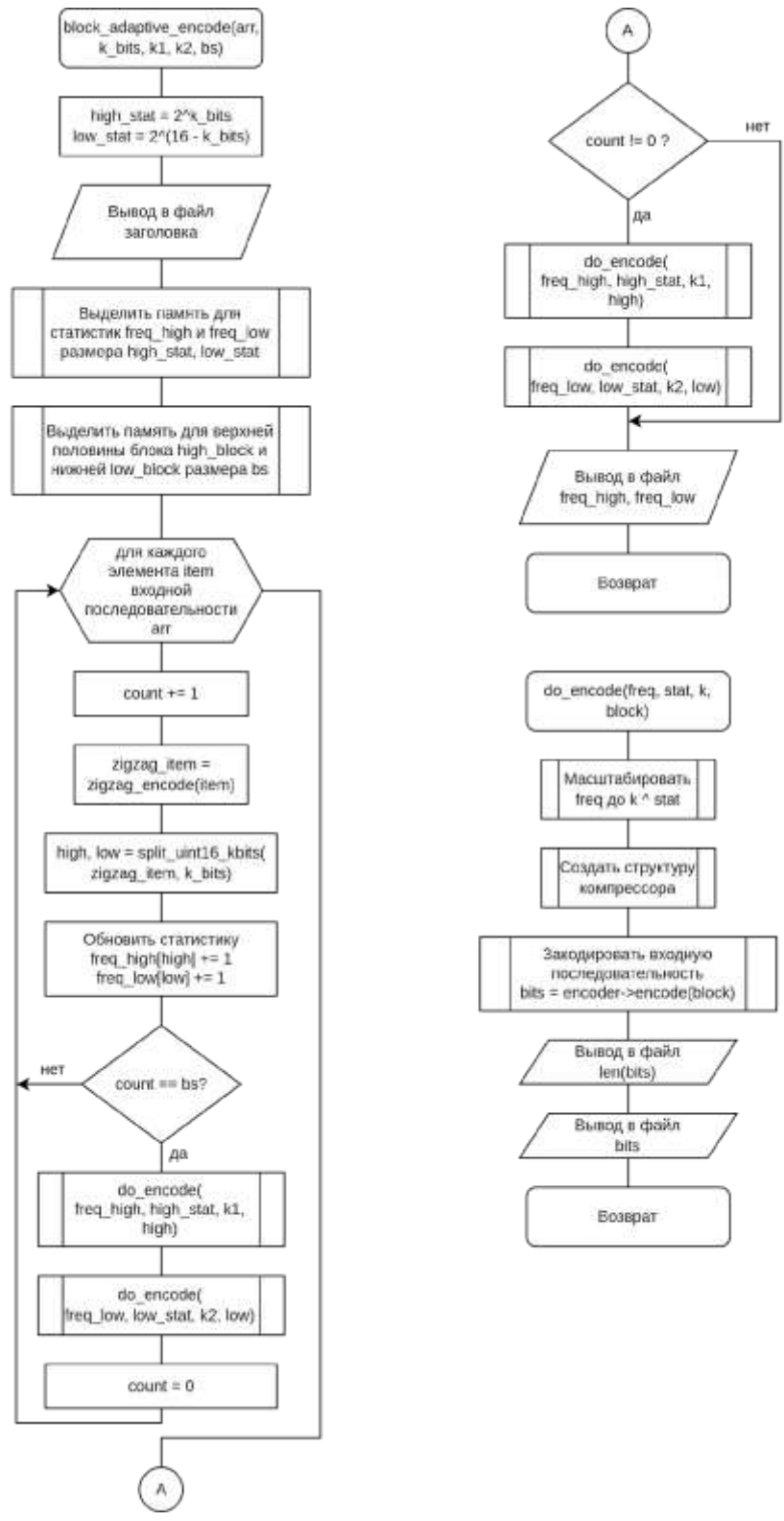


Рисунок 5. Схема работы блочно-адаптивного компрессора

References

1. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. – М. ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – С. 383.
2. Tatwawadi K. What is Asymmetric Numeral Systems? [Электронный ресурс]. — 2019. — URL: <https://kedartatwawadi.github.io/post--ANS/> (дата обращения 28.10.2025).
3. Duda J. Asymmetric numeral systems: entropy coding combining speed of Huffman coding with compression rate of arithmetic coding // arXiv preprint arXiv:1311.2540. — 2013.
4. Yamamoto H. Encoding and Decoding Algorithms of ANS Variants and Evaluation of Their Average Code Lengths // arXiv preprint arXiv:2408.07322. – 2024.

UDC 004.62

Kutsenko A.A. Comparative analysis of lossless hyperspectral compression methods

Сравнительный анализ методов сжатия гиперспектральных данных без потерь

Kutsenko Alexander Alekseevich

Bauman Moscow State Technical University, Russia, Moscow

Куценко Александр Алексеевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», РФ, г. Москва

Abstract. The article analyzes lossless hyperspectral data compression methods, including tANS and Huffman coding. It is shown that tANS combines the efficiency of arithmetic coding with the speed of Huffman coding, achieving compression rates close to the Shannon limit. Due to its implementation simplicity and small table size (1–2 KB), the method is suitable for embedded image processing systems.

Keywords: lossless compression; entropy coding; arithmetic coding; Huffman coding; tANS.

Аннотация. В статье проведён анализ методов сжатия данных без потерь, включая tANS и кодирование Хаффмана. Показано, что tANS сочетает эффективность арифметического сжатия и быстродействие Хаффмана, обеспечивая степень сжатия, близкую к пределу Шеннона. Благодаря простоте реализации и малому расходу памяти, метод применим во встраиваемых системах для сжатия данных.

Ключевые слова: сжатие данных без потерь; энтропийное кодирование; арифметическое кодирование; кодирование Хаффмана; tANS.

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

Сжатие данных – это процесс представления исходной информации в более компактной форме при возможности её точного восстановления либо при допустимом уровне потерь информации. С точки зрения теории информации, предел эффективности сжатия зависит от статистических свойств источника данных и определяется его энтропией, вычисляемой по формуле Шеннона [1]:

$$H = - \sum_i p(s_i) \log_2 p(s_i),$$

где $p(s_i)$ – вероятность появления символа s_i из множества всех символов алфавита $A = \{s_i\}$. Следовательно, для любого источника данных с энтропией H невозможно осуществить сжатие без потерь сильнее, чем до H бит на символ. Оптимальный код использует каждый бит информации максимально эффективно и характеризуется средней длиной, равной энтропии источника.

В целом эффективность сжатия может быть достигнута двумя подходами:

- 1) использованием алгоритмов, которые кодируют элементы с числом бит, пропорциональным вероятности их появления (энтропийное кодирование);
- 2) применением моделей данных, позволяющих отбрасывать малозначимые компоненты, несущественные для восприятия или анализа (моделирующее сжатие).

Алгоритмы сжатия разделяют на два класса: с потерями и без потерь. Методы сжатия с потерями (второй тип в списке выше) предполагают использование модели источника, аппроксимирующей его спектральные или статистические характеристики. Компоненты, не описываемые моделью, затем отбрасываются как малозначимые и кодируются методами сжатия без потерь, что позволяет достичь высокой эффективности сжатия за счёт частичной потери информации. Методы без потерь, напротив, обеспечивают восстановление исходных данных бит-в-бит, но обычно достигают меньших коэффициентов сжатия.

В компрессорах данных используются методы двух типов: методы предобработки данных и методы сжатия. Методы преобразования данных направлены на устранение избыточности и эффективное кодирование информации. Они используются для изменения статистических параметров сжимаемых данных с целью оптимального кодирования энтропийным кодировщиком. Методы сжатия выполняют кодирование передаваемых символов кодами разной длины, то есть осуществляют непосредственно сжатие данных. Для некоторых методов известен закон распределения символов, при котором данный метод показывает лучшую эффективность. Другие же используют оценку вероятностей появления символов и могут оптимально кодировать данные с разным распределением.

К простейшему методу энтропийного кодирования относятся коды Голомба-Райса. Кодирование Голомба-Райса представляет собой эффективный метод сжатия данных от целочисленных источников с геометрическим распределением, то есть в данных большая плотность значений около нуля и она уменьшается с увеличением этих значений. Данный метод подходит в случае, когда малые значения встречаются существенно чаще больших [1]. Идея метода заключается в разделении исходного числа n на две части:

- 1) частное $q = n \operatorname{div} m$, $m = 2^k$,
- 2) остаток $r = n \operatorname{mod} m$.

Частное q представляется унарным кодом, остаток r прямым кодом переменной длины. Преимуществом данного подхода является простота реализации (особенно благодаря быстрым битовым операциям), высокая эффективность для источников с

геометрическим распределением данных, адаптивность (параметр k можно менять для блоков данных по отдельности), а также отсутствие дополнительных расходов по памяти. К недостаткам можно отнести рост длины кода при больших n , неэффективность для равномерных распределений, а также чувствительность к выбору k (влияет на качество сжатия).

Следующим по простоте реализации является кодирование Хаффмана. Кодирование с использованием кода Хаффмана представляет собой метод энтропийного сжатия данных, основанный на частотном распределении символов входного алфавита. Алгоритм строит префиксное двоичное дерево, в котором часто встречающимся символам сопоставляются более короткие кодовые последовательности, а редко встречающимся – длинные.

Для построения оптимального набора кодов требуется получить статистику частоты символов, что может быть выполнено заранее при первом проходе по данным (статический вариант) или динамически – в процессе кодирования и декодирования (в этом случае используется адаптивный алгоритм Хаффмана).

Преимуществом метода является то, что генерируемые коды Хаффмана являются префиксными, то есть никакой символ не является началом другого. За счёт этого упрощается декодирование: достаточно последовательно читать символы из закодированного потока до тех пор, пока накопленная часть не совпадет с одним из имеющихся кодов. Важным является и то, что кодирование Хаффмана в худшем случае не увеличивает длину сообщения по сравнению с длиной входного сообщения.

К недостаткам можно отнести необходимость двойного прохода по последовательности (для подсчета статистики и непосредственно для кодирования). Этот недостаток можно исправить, воспользовавшись адаптивным вариантом метода, который кодирует символы на лету. Также в этом случае отпадает необходимость в хранении таблицы символов.

Другим вариантом энтропийного сжатия является арифметическое кодирование. Арифметическое кодирование – это метод сжатия без потерь, при котором все сообщение (последовательность символов) представляется в виде одного вещественного числа в интервале $[0, 1)$. В отличие от кода Хаффмана, который сопоставляет каждому символу отдельный код фиксированной длины, арифметическое кодирование описывает вероятность появления всей последовательности, постепенно сужая числовой интервал по мере обработки символов. Такой подход позволяет достигать эффективности, близкой к теоретическому энтропийному пределу, даже для небольших алфавитов и статистически зависимых последовательностей [1].

Основная идея метода заключается в итерационном уточнении интервала $[0, 1)$ на

основании вероятностной модели символов. Для каждого символа исходного алфавита априорно известна вероятность его появления $p(s_i)$. Для каждого символа вычисляется верхняя и нижняя границы его подынтервала внутри текущего рабочего интервала, смещенной от его начала на накопленную сумму вероятностей предыдущих символов. Далее, при последовательной обработке символов рабочий интервал сужается до подынтервала, соответствующего очередному символу. В итоге, любое число из финального интервала (чаще всего выбирают среднее значение из интервала) однозначно представляет все исходное сообщение.

Преимущество метода заключается в том, что распределение вероятностей описывается более точно. Происходит это из-за того, что коды Хаффмана ограничены степенью двойки, тогда как арифметическое кодирование использует весь диапазон вещественных чисел для этого.

Недостатком метода является его вычислительная сложность. Обработка каждого символа требует поиска нужного диапазона в таблице символов (задача облегчается, если значения отсортированы по убыванию), а также сложными операциями вещественного умножения (по 2 операции на обработку одного символа). Помимо этого итоговое состояние кодера, то есть финальное число, достаточно быстро достигает предела точности вещественной арифметики. По этой причине используется операция увеличения текущего рабочего диапазона до предыдущего (большего) тогда, когда часть бит текущего состояния фиксируется. Эта операция требует дополнительных вещественных вычислений.

В [2] приведено сравнение арифметического кодера и кодировщика Хаффмана. В результате, использование арифметического кодера дает преимущество по степени сжатия от 6 % до 100 % по сравнению с кодировщиком Хаффмана. Однако время работы такого кодера дольше в 2-4 раза.

Современным продолжением развития арифметического кодировщика являются методы асимметричных систем счисления (англ. Asymmetric Numeral Systems, ANS). ANS алгоритмы объединяют эффективность арифметического кодирования со скоростью кодирования Хаффмана [3].

Основная идея ANS методов заключается в представлении последовательности символов в виде единственного целого числа – состояния, которое увеличивается по мере обработки последовательности. Идея схожа с арифметическим кодером, но вместо двух вещественных чисел используется одно целое, благодаря чему количество операций умножения при обработке каждого символа уменьшается вдвое (с двух до одной). Известны варианты реализации ANS алгоритмов для разных алфавитов: qABS – для бинарных алфавитов, rANS – потоковый компрессор для больших алфавитов, tANS –

версия rANS, использующая машину состояний для описания процесса кодирования.

Особенного внимания заслуживает табличный tANS поскольку в нем работа метода ограничивается диапазоном I_5 с помощью таблицы переходов в виде конечного автомата. По сути, формирование этой таблицы переходов является единственной ресурсоемкой операцией. После того как таблица сформирована, вся работа кодера состоит из переходов из одного состояния в другое с выдачей бит в результирующий поток. Благодаря последнему свойству, tANS метод применим даже во встраиваемых системах для сжатия гиперспектральных изображений.

В работе [4] перечислены основные преимущества и недостатки tANS метода. К преимуществам можно отнести следующее:

- 1) высокая скорость работы – операции просты и выполняются через таблицы и целочисленную арифметику, подходящую для SIMD и аппаратных реализаций;
- 2) эффективность – коэффициент сжатия близок к энтропийному пределу (зависит от размера таблицы);
- 3) компактность – таблицы обычно занимают не более 1-2 Кбайт.

Так, для таблицы размера 256 tANS работает в 2 раза быстрее Хаффмана при схожей с арифметическим кодером степени сжатия [4]. Стоит отметить, что точность приближения к энтропийной степени сжатия зависит от размера таблицы. Оптимальных значений можно достичь, если взять таблицу в 4 или 8 раз больше базовой (включающей все символы алфавита 1 раз) [5].

К недостаткам можно отнести следующее:

- 1) необходимость предварительного построения таблиц на основе статистики;
- 2) сложность реализации по сравнению с простыми кодами (например, Хаффмана);
- 3) эффективность может снижаться на очень коротких блоках данных.

Таким образом, tANS представляет собой современный гибридный метод энтропийного сжатия, сочетающий эффективность арифметического подхода и быстродействие кода Хаффмана. Он реализует числовое представление данных через переходы между состояниями с фиксированной битовой ёмкостью, обеспечивая одновременно высокую скорость и теоретическую эффективность, близкую к пределу Шеннона. В случае если вычислительные ресурсы сильно ограничены, можно воспользоваться кодами Хаффмана, однако tANS метод показывает существенно более высокую степень сжатия.

References

1. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. – М. ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – С. 383.
2. Shahbahrami A. Evaluation of Huffman and Arithmetic Algorithms for Multimedia Compression Standards // International Journal of Computer Science, Engineering and Applications (IJCSEA). — 2011. — С. 11.
3. Brian K. Lossless Compression with Asymmetric Numeral Systems [Электронный ресурс]. — 2020. — URL: <https://bjlkeng.io/posts/lossless-compression-with-asymmetric-numeral-systems/> (дата обращения 10.02.2026).
4. Duda J. Asymmetric numeral systems: entropy coding combining speed of Huffman coding with compression rate of arithmetic coding // arXiv preprint arXiv:1311.2540. — 2013.
5. Yamamoto H. Encoding and Decoding Algorithms of ANS Variants and Evaluation of Their Average Code Lengths // arXiv preprint arXiv:2408.07322. – 2024.

UDC 633.854.78

Shitikova M.M., Platova R.A., Platov Y.T. Quality control of sunflower seeds using UV-VIS-NIR spectrometry

Контроль качества семян подсолнечника методом UV-VIS-NIR спектроскопии

Shitikova M.M.

PhD student of the Basic Department of Quality Industry,
FSBEI HE Plekhanov Russian University of Economics

Platova R.A.

PhD candidate in Engineering, associate professor of the Basic Department of Quality Industry, FSBEI HE Plekhanov Russian University of Economics

Platov Y.T.

PhD in Engineering, professor of the Basic Department of Quality Industry,
FSBEI HE Plekhanov Russian University of Economics

Шитикова М.М.

аспирант базовой кафедры индустрии качества,

ФГБОУ ВО «Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова»

Платова Р.А. доцент

базовой кафедры индустрии качества, к.т.н.,

ФГБОУ ВО «Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова»

Платов Ю.Т.

профессор базовой кафедры индустрии качества, д.т.н.,

ФГБОУ ВО «Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова»

Abstract. The paper explores the application of non-destructive control methods, particularly UV-VIS-NIR spectrometry and colorimetry in the CIEL*a*b* system, to assess the component composition and color of various sunflower seeds in their entirety without removing the husks. The analysis of diffuse reflection spectra revealed characteristic absorption bands associated with the vibrations of C-H and O-H functional groups, indicating the heterogeneous distribution of oil and moisture in the samples. The color coordinates of the colorimetric system indicated dark, close to black, slightly saturated color of the seeds; the linear dependence of the a* and b* coordinates also confirmed the differences in the composition of the seeds. Moisture and oil content studies have showed that more than 45% of the samples exceeded the permissible moisture content, and none of the varietal samples could be classified as first class. The results of the study confirm the feasibility and prospects of using a non-destructive method for controlling the quality of sunflower seeds.

Keywords: sunflower seeds, non-destructive testing, UV-VIS-NIR spectrometry, colorimetric system, component composition.

Аннотация. В работе исследуется применение неразрушающих методов контроля, в частности, UV-VIS-NIR спектроскопии и колориметрии в системе CIEL*a*b* для оценки компонент-состава и цвета семян подсолнечника различных сортов в целостном виде без снятия лузги. Анализ спектров диффузного отражения выявил характерные полосы поглощения, связанные с колебаниями связей, характерных для C-H и O-H функциональных групп, что свидетельствует о неоднородном содержании масла и влаги в образцах. Цветовые координаты колориметрической системы указали на темный, близко к черному, слабонасыщенный цвет семян; линейная зависимость координат a* и b* также подтвердила различия в составе семян. Исследования влаги и масличности показали, что более чем 45% образцов превышают допустимую влажность, и ни один из сортовых образцов не может быть отнесен к первому классу. Результаты исследования подтверждают целесообразность и перспективность использования неразрушающего метода для контроля качества семян подсолнечника.

Ключевые слова: семена подсолнечника, неразрушающий контроль, UV-VIS-NIR-спектроскопия, колориметрическая система, компонент-состав.

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент.

Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Введение

Семена подсолнечника играют важную роль в продовольственной сфере благодаря высокой пищевой ценности, разнообразному химическому составу и широте использования. Семена содержат липиды (от 42,1 до 54,3%), более 20% клетчатки, углеводы, а также до 33% белковых веществ. Витаминный комплекс семян подсолнечника представлен витаминами группы А, В, С, D, Е и РР [1]. Семена используются как для непосредственного употребления в пищу, так и для производства ряда пищевых продуктов – кондитерских изделий, масложировой продукции; побочные продукты семян после проведения экстракции или прессования также используются в промышленности: лузга, жмыхи, шрот.

Семена подсолнечника подразделяются на классы в соответствии с ГОСТ 22391-2015. Семенами подсолнечника считаются целые и поврежденные семена подсолнечника, по характеру их повреждений, не относящихся к масличной или сорной примеси. Основными органолептическими показателями при оценке семян являются здоровое состояние, свойственные сортам цвет и запах. Инструментальными способами измеряют массовую долю влаги, масла в пересчете на сухое вещество, масличную и сорную примесь.

Исследование содержания масла определяется рефрактометрическим или экстракционным методом, что является наиболее трудоемким и дорогостоящим ввиду значительного количества аппаратуры и материалов, а также потери основного свойства семян после измельчения до состояния муки. С использованием сушильного шкафа, предварительно выдержав семена, определяется массовая доля влаги.

Разрушающие методы не являются в полной мере достаточно эффективными, так как при проведении исследования объект подвергается потери основных свойств вследствие пробоподготовки, а также затрачиваются значительные временные и материальные издержки.

Цвет семян определяется визуально; однако, для объективной оценки цвета семян используют инструментальный метод с определением цветовых характеристик в колориметрической системе CIE L*a*b*. Преимуществом использования данного инструментария станет ускоренное проведение неразрушающей качественной оценки объекта с помощью портативного устройства, высокая точность исследования, а также эффективность в отрасли растениеводства. Использование данной методики было описано в работах [2,3] при определении окраски бобов сои, говядины и других продовольственных товаров, а также в требованиях к оценке цвета продуктов переработки овощей и фруктов.

В настоящее время при оценке семян применяются такие методы неразрушающего контроля, как гиперспектральная визуализация (сортовое деление, химический состав) [4], спектральная люминисценция, спектроколориметрия, UV-VIS-NIR спектроскопия (функциональные группы, категории), рамановская спектроскопия (состав), томография и микрофокусная рентгенография (выявление дефектов). Успешное применение данных методик было описано в работах [5,6,7].

Одной из проблем оценки качества семян подсолнечника является определение значения свойств неразрушающим методом контроля без снятия лузги. Поэтому в этом исследовании проведено измерение спектров диффузного отражения в видимом и ближнем диапазоне семян без снятия лузги. Настоящим исследованием представлены результаты по использованию метода UV-VIS-NIR спектрометрии для оценки цвета и компонент-состава сортов семян подсолнечника по полосам поглощения спектров.

Объект и методы исследования

Для проведения качественного исследования семян подсолнечника были отобраны 24 сорта семян подсолнечника: каждый образец был помещен в крафтовый зип-пакет и пронумерован. Способом выделения среднего объема пробы методом диагонального деления были выделены 50 семян каждого сорта (рисунок 1), взвешены с помощью лабораторных весов “Ohaus”, очищены от крупной сорной примеси.



Рисунок 1 – Образцы исследования: упаковка, выделение навески, очистка от примеси (источник – создано автором)

Массовая доля влаги определялась путем высушивания навески семян в сушильном шкафу с терморегулятором. Процентное содержание влаги рассчитывают по потере массы семени после высушивания.

Массовая доля масла в пересчете на сухое вещество определялась с помощью прибора «FOSS – INFRATEC TM 1245». Принцип работы устройства заключается в измерении отражения инфракрасного излучения от пробы семян по характеру спектра, с использованием калибровочных моделей определяется содержание масла.

Измерение UV-VIS-NIR-спектров поглощения семян подсолнечника было проведено на портативном спектрометре ASD TerraSpec® 4 Hi-Res в диапазоне 350—2500 нм. Использование данного инструмента имеет ряд преимуществ: измерение диффузного отражения можно проводить in situ, без пробоподготовки; при измерении спектров используется проба большого объема и массы, что повышает достоверность и репрезентативность результатов; сочетание видимого (VIS) и ближнего (NIR) инфракрасного диапазонов позволяет, с одной стороны, определить по VIS-диапазону цветовые характеристики и центры окраски, с другой – идентифицировать NIR-по диапазону функциональные группы компонентов химического состава семян подсолнечника.

Результаты и их обсуждение

Семена всех сортов находились в здоровом состоянии, без повреждений; запах – свойственный здоровым семенам подсолнечника.

На рисунке 2 представлены результаты исследования «Массовой доли влаги» каждого сорта семян: диапазон значений варьируется от 7,23% до 8,87%; сорта, у которых результат значения превышает 8,0% не являются допустимыми для реализации на рынке ЕАЭС, так как доля влаги влияет на срок хранения, порчу, возникновение плесени и заболеваний. По данным рисунка 2 значения показателя влажности сортов под номером 2, 3, 6, 9, 11, 13, 15, 17, 18, 20 и 22 не соответствуют техническим требованиям (45,8% от генеральной выборки из 24 сортов семян).



Рисунок 2 – Массовая доля влаги, % в исследуемых образцах
(источник – создано автором)



Рисунок 3 – Массовая доля масла в пересчете на сухое вещество, % в исследуемых образцах (источник – создано автором)

На рисунке 3 представлены результаты исследования «Массовой доли масла в пересчете на сухое вещество» каждого сорта семян. По полученным значениям, представленным на рисунке 3, ни один из образцов не может быть отнесен к первому классу, поскольку значения менее 50%; образцы под номерами с 1 по 4 относятся ко второму классу; с 5 по 19 к третьему классу; с 20 по 24 не могут быть ранжированы по классовому делению ввиду значения менее 40%, вследствие чего образцы не могут быть отнесены ни к какому классу и использованы на территории ЕАЭС для продовольственных целей.

Коэффициенты диффузного отражения (R) были преобразованы коэффициентом поглощения длин волн спектра по функции $A = \log(1/R)$. Профили UV-VIS-NIR-спектров поглощения семян подсолнечника разных сортов после предварительной обработки представлены на рисунке 4. Из рисунка видно, что спектры всех семян имеют аналогичный профиль, что свидетельствует об однородности состава по компонентам, но различаются по коэффициенту поглощения, характеризующему различный компонент-состав.

Положение пика 870 нм, а также пики 2275-2339 нм связаны с колебаниями связей, характерных для C-H-функциональных групп, и характеризуют содержание липидов в образцах, различия в степени масличности подтверждаются профилями; положение пиков 1431 и 1926 нм связано с колебаниями - O-H и характеризует содержание влаги [7,8]. Существенное расхождение значений на пике 680 нм в видимой области может характеризовать несколько причин: часть образцов не достигло полной зрелости, что указывает на остаточные пигменты, или это фон ввиду ошибки измерения лузги семени. То есть, образцы семян подсолнечника отличаются по составу, что

позволяет разработать калибровочную модель для категорирования семян по отдельным показателям, например, степени масличности.

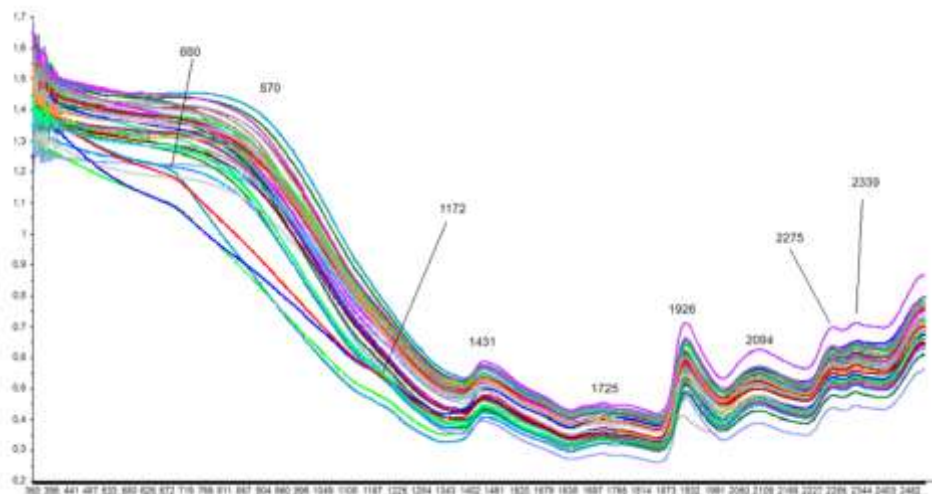


Рисунок 4 – Профили UV-VIS-NIR спектров поглощения в диапазоне 350—2500 нм семян подсолнечника без снятия лузги (источник – создано автором)

По диапазону видимой области рассчитаны цветовые характеристики семян подсолнечника в системе $CIE L^* a^* b^*$, которые представлены на рисунке 5. Цветовая координата светлоты L^* имеет значения в диапазоне от 22,51 до 35,17 (среднее значение 27,42); значения координаты a^* (разница красного/зелёного в цвете) имеет значения в диапазоне от -0,058 до 1,379 (среднее значение 0,56); значения координаты b^* (жёлтые/синие оттенки) имеет значения в диапазоне от -0,972 до 4,95 (среднее значение 1,6).

Из рисунка 5 видно, что наблюдается прямая линейная зависимость между изменениями координат цвета a^* и b^* . Вероятно, такое различие цветности (красно-желтая область) свидетельствует о различии по составу семян подсолнечника. В то же время по изменению в плоскостях координат L^* и a^* , L^* и b^* видно, что светлота снижается без взаимосвязи с показателем цветности. Таким образом, семена подсолнечника обладают низкой светлотой, низкой насыщенностью цвета, что дает основание считать цвет образцов темно-серым и в некоторых случаях даже черным.

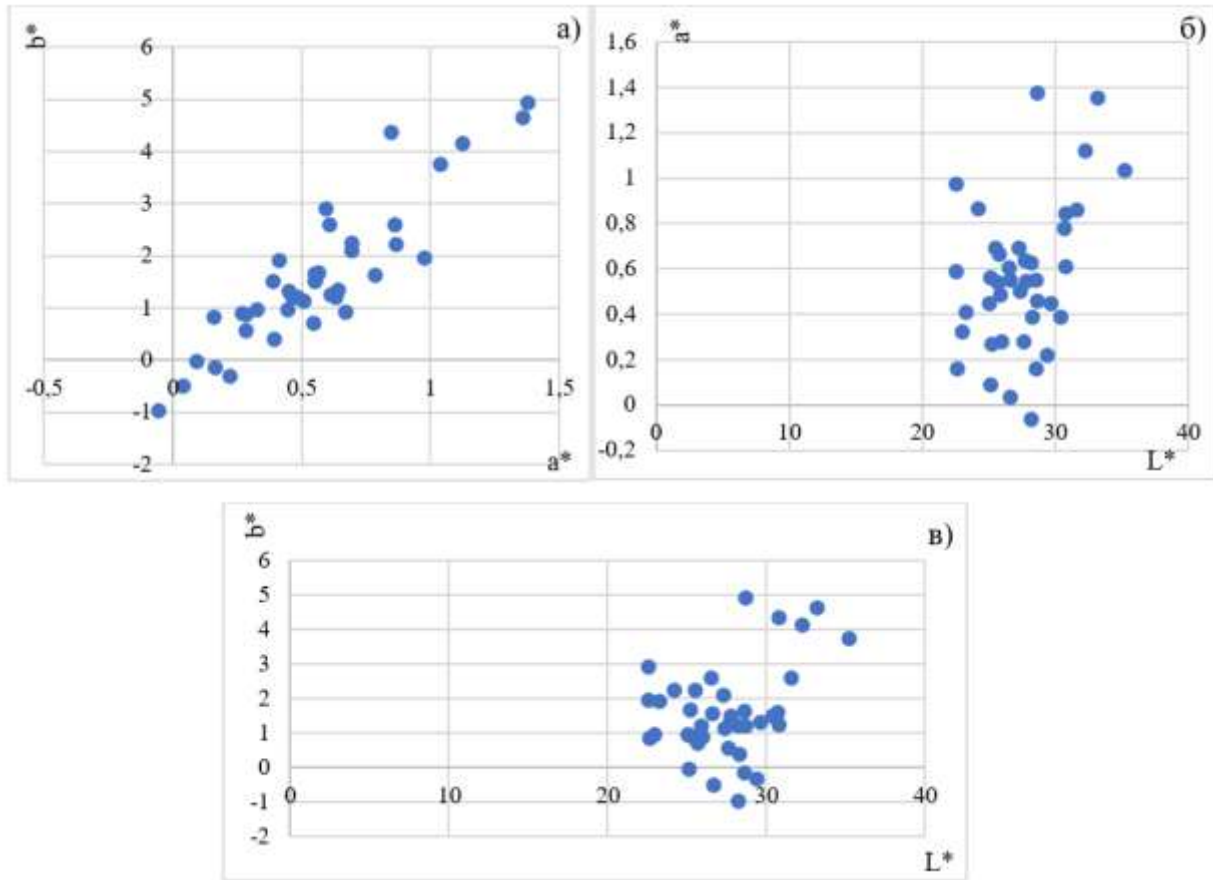


Рисунок 5 – Расположение точек, соответствующих семенам подсолнечника различных сортов без снятия лузги, в плоскостях координат колориметрической системы CIE $L^*a^*b^*$: а) a^* и b^* ; б) L^* и a^* ; в) L^* и b^* (источник – создано автором)

Вывод

Анализ качества семян подсолнечника по стандартизированным методам, основанным на разрушающем контроле, имеет свои ограничения, связанные с высокой трудоемкостью, временными затратами и потерей основного свойства объекта в виду потери пробы вследствие снятия лузги. Применение неразрушающих методов контроля, отраженное в исследовании, позволило оперативно и эффективно оценить такие качественные и количественные показатели, как масличность, влажность, цвет.

Исследование выявило из части образцов семян значительные отклонения по массовой доле влаги, что свидетельствует о непригодности семян для продовольственных целей. Цветовые параметры семян в координатах системы CIE $L^*a^*b^*$ свидетельствуют о взаимосвязи между цветовой характеристикой и химическим составом семени, что дает основание предложить использование колориметрии в качестве инструмента для сортового деления и категорирования.

Полученные данные свидетельствуют о возможности применения неразрушающих методов контроля в агропромышленной комплексе для создания калибровочных моделей сортов семян, автоматизации сортового деления, эффективного контроля качества на различных этапах товародвижения. В перспективе можно также говорить о создании цифровых профилей сортов семян подсолнечника для решения вопросов стандартизации, классификации и безопасности продовольственных товаров масличной отрасли.

References

- 1) Марчик Т. П. Почвоведение с основами растениеводства : учеб. пособие / Т. П. Марчик, А. Л. Ефремов ; Учреждение образования "Гродненский государственный университет имени Янки Купалы". – Гродно : ГрГУ, 2006. – 249 с. – ISBN 985-417-828-5. – URL: https://ebooks.grsu.by/pochva_s_osn_rast/index.htm (дата обращения: 01.02.2026). – Текст : электронный.
- 2) Лысенкова, А. А. Идентификация и мониторинг качества семян сои методами оптической спектроскопии / А. А. Лысенкова, Ю. Т. Платов // Научный аспект. – 2024. – Т. 63, № 5. – С. 8475-8485. – EDN LPUEDH. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68007101> (дата обращения: 01.02.2026). – Текст : электронный.
- 3) Somin Kim, Woo-Ju Kim, Hansol Doh. Evaluation of beef quality using machine learning based on the CIELAB color space / S. Kim, W. Kim, H. Doh. // Food Control. – 2026. V. 180. – P. 11. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956713525005110> (дата обращения: 01.02.2026). – Текст : электронный.
- 4) Беляков, М. В. Идентификация сортов семян сои спектральным люминесцентным методом / М. В. Беляков // Агроинженерия. – 2026. – Т. 28, № 1. – С. 87-96. – DOI 10.26897/2687-1149-2026-1-87-96. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=88946780> (дата обращения: 01.02.2026). – Текст : электронный.
- 5) Biao Wu, Hongyi Bai, Lajun Sun, Yanru Fang, Zibo Han, Shihao Zhang. Varieties identification of soybean seed using visible/near-infrared spectroscopy based on ensemble wavelength selection method / B. Wu, H. Sun, Y. Fang, Z. Han, S. Zhang // Infrared Physics & Technology. – 2026. V. 153. – P. 12. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449525006516> (дата обращения: 01.02.2026). – Текст : электронный.

6) Maryam Kolahi, Mohammad Javaheriyani, Hora Naghisharifi, Mohammad Sabaeian, Milad Yazdi, Behrooz Zargar. Phytochemical analysis and aging assessment of canola seeds supported by hyperspectral imaging / M. Kolahi, M. Javaheriyani, H. Naghisharifi, M. Sabaeian, M. Yazdi, B. Zargar // Italian Journal of Agronomy. – 2026. V. 21. I. 1. – P. 14. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1125471825000441> (дата обращения: 01.02.2026). – Текст : электронный.

7) Ситникова, В. Е. Практикум по колебательной спектроскопии: учеб. пособие / Т.Н. Носенко, В.Е. Ситникова, И.Е. Стрельникова, М.И. Фокина; – СПб: Университет ИТМО, 2021. – 173 с. – URL: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/2735.pdf> (дата обращения: 01.02.2026). – Текст : электронный.

8) Смирнова, Н. Н. Инфракрасная спектроскопия в химии высокомолекулярных соединений : учеб. пособие / Н. Н. Смирнова, и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2021. – 84 с. – URL: https://op.vlsu.ru/fileadmin/Programmy/Bacalavr_academ/04.03.01/Metod_doc/2022/IK_spektroskopija_v_khimii_vysokomolekuljarnyx_soedinenii.pdf (дата обращения: 01.02.2026). – Текст : электронный.

TRANSPORT AND MOBILITY

UDC 656.11

Ganchimeg J., Battur B., Dugerjav M. Feasibility study on reducing road congestion in Ulaanbaatar city

Ganchimeg J., Battur B., Dugerjav M.

School of Management
University of Science and Technology
Ulaanbaatar, Mongolia

Abstract. Nowadays, in line with the population growth of Ulaanbaatar city, road traffic is increasing rapidly, and the time spent on the road by citizens is increasing significantly. The purpose of this research is to determine the role and impact of railway transport in reducing road congestion in Ulaanbaatar city. The study emphasizes that the commissioning of the Khushi Valley railway will reduce the flow of freight and passenger transport through the city and reduce the need for branch road diversions. As a result, it is possible to reuse the old railway infrastructure in the city for public transport purposes, and to study how this will affect the reduction of road congestion. The research was conducted using quantitative analysis methods and was based on the study of the structure of the suburban railway network of UBTZ, the branch roads of private enterprises, their capacity indicators, as well as the current situation of road congestion. According to the results of the study, the phased transfer of railway freight traffic and logistics operations passing through the city center to the outskirts of the city will not only have a tangible impact on reducing road congestion, but also create many advantages, such as improving the continuity of road traffic, developing new types of public transport, and increasing the efficiency of urban planning.

Keywords: Railway, Traffic, Road congestion

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

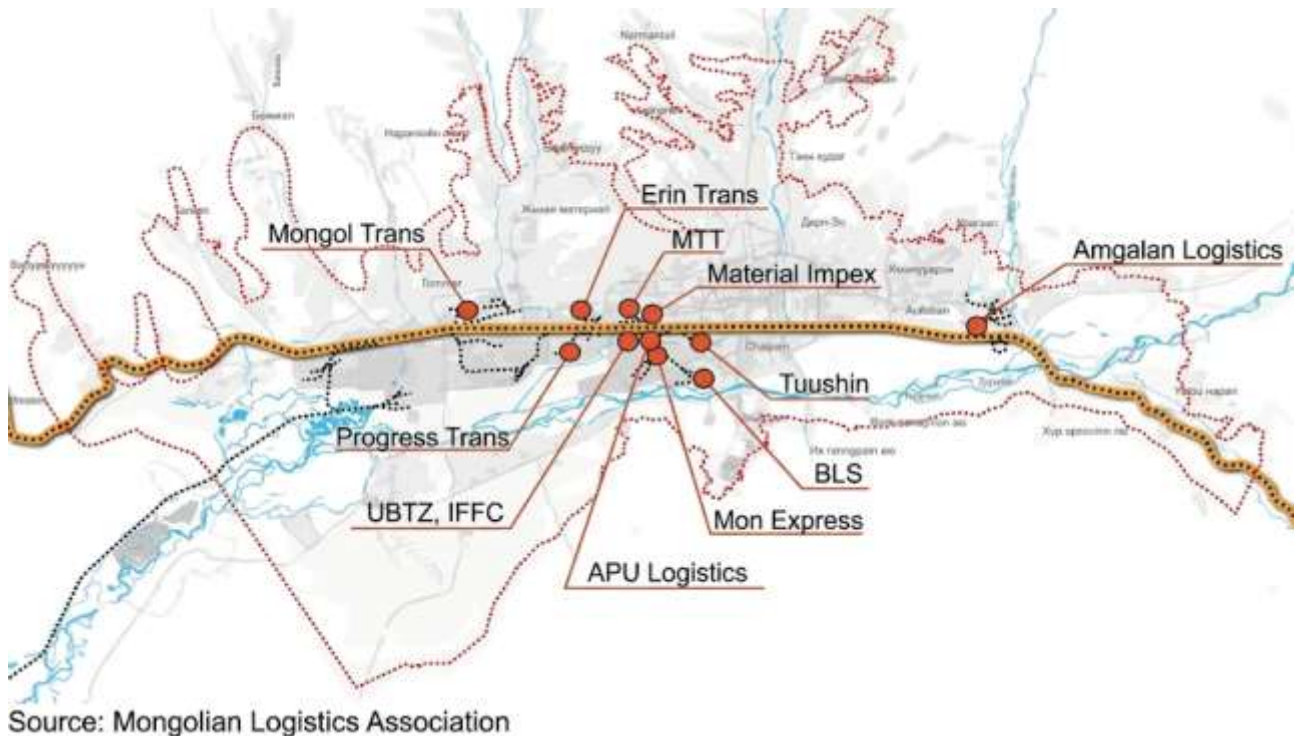
INTRODUCTION

Traffic congestion in Ulaanbaatar has become one of the pressing socio-economic problems of Mongolia. Therefore, within the framework of the goal of reducing congestion, it is intended to implement comprehensive measures such as expanding the road network, upgrading roads and road facilities, improving the quality and accessibility of public transport, and introducing a smart integrated traffic system. It is also pursuing a policy of reducing road congestion by introducing large-capacity public transport modes such as the metro, special road buses /BRT/, and light rail trains /LRT/ based on foreign investment.

In addition, on December 7, 2023, the law “On reducing traffic congestion in the capital city of Ulaanbaatar and housing in ger districts” was approved by the joint session of the Mongolian State Great Khural, which was an important step in creating the legal environment for implementing the above measures.

Among these solutions, this research study focuses on the impact of railway transport and aims to analyze and prove its effectiveness through quantitative and qualitative research methods.

Since there is no integrated freight logistics terminal in Ulaanbaatar that meets modern international standards for receiving full trains, freight logistics operations are branched out from Amgalan, Ulaanbaatar, and Tolgoi stations, and freight is distributed through 10 freight terminals and more than 300 branch roads. In addition, these terminals are scattered in the city center and adjacent to residential areas, which increases the time spent on railway separation and switching operations and the waiting time of vehicles at level crossings with them, which continues to affect congestion.



Зйпар-1. Transport terminals in the center of Ulaanbaatar

The aim is to study and prove the solution of using the main line of the UBTZ, which divides Ulaanbaatar city into two parts, along with some branch roads, for public high-capacity transport.

“Ulaanbaatar City Development Corporation” JSC is implementing a project to establish an integrated freight logistics center for Ulaanbaatar city on an area of 130 hectares on the “Khushi Valley” railway line, 34 km from the city center, in the southeast of the capital.

The project is included in the general plan for the development of the capital until 2030, approved by Resolution No. 23 of the State Great Khural of Mongolia, and subsequently

included in the “Vision-2050” General Plan for the Long-Term Development of Mongolia, and legalized by Resolution No. 52 of the State Great Khural of May 13, 2020.

THEORETICAL OVERVIEW RESEARCH

Traffic congestion refers to the process of slowing down traffic on the road network and creating long queues of vehicles as the number of vehicles increases. According to researchers, when the number of cars per 1,000 people exceeds 30, road capacity decreases and traffic problems begin to arise. However, when the indicator exceeds 130, it is believed that there is a need to impose certain restrictions on the use of motor vehicles, while when it reaches 200–250, it is believed that it is necessary to implement policies to support public transport and give them priority.

However, in the case of Ulaanbaatar, the number of cars per 1,000 people has reached 239, indicating that road traffic is at an excessively high level, indicating the urgent need to develop public transport and implement a demand-based transport policy.

Many major cities around the world have experienced significant reductions in road congestion by moving railway lines out of city centers, detouring them, or using them as high-capacity public transportation systems for passenger transportation. Researchers Vuchic (2007) and Rodrigue (2020) have found that rail-based public transportation is one of the most effective solutions for reducing road congestion, as it provides high-throughput and sustainable mobility. For example:

- In Seoul, South Korea, the Gyeongui Line was reorganized and a project was implemented between 2000 and 2010 to reduce freight traffic through the city center, move some parts underground, and use the remaining lines for passenger transportation. In this context, Seoul Development Institute (2012) and Kim & Lee (2014) concluded that road congestion was reduced by 30–50 percent through comprehensive planning of the urban railway environment, integrating public transportation and green spaces.

- The Chicago Region Environmental and Transportation Efficiency Program (CREATE) program, launched in 2003 in Chicago, USA, has been reducing congestion at railroad crossings and crossings by constructing bypasses, flyovers, and new routes. According to research by Cambridge Systematics (2015) and the Federal Railroad Administration (2018), the project has reduced peak-hour traffic congestion by 15–25 percent and vehicle delays at railroad crossings by up to 30 percent.

— In general, international studies have shown that the optimal organization of the railway network in coordination with urban planning is an important factor in

reducing road traffic, increasing the use of public transport, and supporting sustainable urban development (Vuchic, 2007; Rodrigue, 2020).

In addition to the above experiences, there are many examples of other cities around the world reducing road congestion with rail-based transport solutions. Researchers Cervero (1998) and Newman & Kenworthy (2015) have found that railways and high-capacity public transport systems have a significant impact on reducing car dependence and improving the efficiency of urban mobility. For example:

— In Tokyo, Japan, the rail-based public transport network is the mainstay of urban mobility. Most passenger traffic in the city is carried by rail, and car use is relatively low. According to a study (Japan Transport Policy Study, 2016), a high-density rail network plays a key role in keeping traffic congestion at a sustainable low level.

— In London, UK, the Crossrail (now Elizabeth Line) project, which connects the city's suburbs and the city center, has significantly increased public transport capacity. According to an assessment by Transport for London (2022), the project has significantly reduced road traffic in the central area and significantly reduced travel times.

— In Paris, France, the RER (Réseau Express Régional) suburban rail system has been developed to reduce car traffic into the city center. According to a report by the OECD (2019), the RER system carries millions of passengers per day and contributes significantly to reducing traffic congestion.

— In Berlin, Germany, the coordinated development of the S-Bahn and U-Bahn systems has increased public transport accessibility and reduced car use. According to BVG (Berlin Transport Authority, 2020), high public transport use is a key factor in maintaining the city's congestion level.

Therefore, international experience shows that developing a rail-based public transport system and rationally organizing freight and passenger traffic is an effective and long-term sustainable solution to reducing road congestion (Cervero, 1998; Newman & Kenworthy, 2015).

The Mongolian Government's Resolution No. 229 of December 25, 2024, declared 2025 as the "Year of Supporting the Development of the Capital City Infrastructure". In this context, a total of 24 projects are planned to be implemented between 2025 and 2028 to reduce road congestion in Ulaanbaatar. The following projects and programs are included in the transport infrastructure sector. These include:

- Ulaanbaatar Metro
- Ulaanbaatar Tram
- Tuul Highway

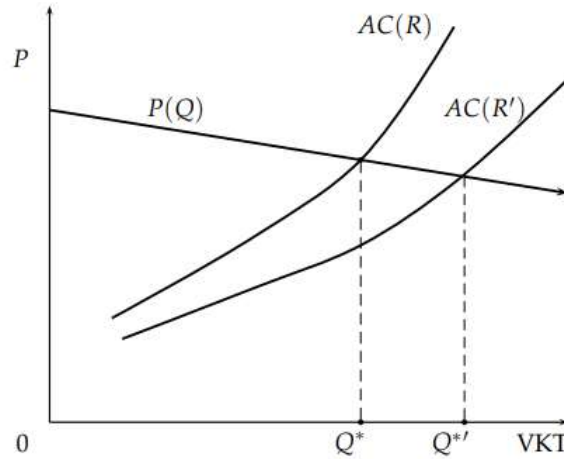


Figure-3. Road traffic demand and supply

Lesson: R – total length of road (lane-km)

Q – total number of trips (VKT)

P(Q) – “demand” for travel or people’s willingness to travel (inverse demand)

C(R, Q) – total cost

AC(R, Q) = C(R, Q) / Q – average cost (cost per kilometer of travel)

To explain the congestion in Ulaanbaatar, Q (travel) is too high, AC (congestion cost) is too high, and overall the system is in a “bad equilibrium”.

RESEARCH SECTION

In Ulaanbaatar, 54.1 percent of all registered vehicles are on the road, indicating a high concentration of traffic on the city’s roads. A survey conducted among the city’s citizens found that 85 percent of respondents considered traffic congestion to be a pressing issue that needed to be addressed urgently, clearly demonstrating the socio-economic importance of the issue (World Bank, 2020).

The current average speed of traffic on the city’s roads is 13 km/h, but during peak hours it drops to 8.9 km/h, indicating a significant deterioration in traffic efficiency. The study found that the road network has exceeded its capacity three times compared to 2010, indicating that the growth of vehicles has significantly outpaced the development of the city’s infrastructure (Asian Development Bank, 2021).

The socio-economic consequences of congestion are also high. For example, citizens spend an average of 2.5 hours per day, approximately 35 days per year, in traffic jams, with the resulting lost opportunity cost reaching 2.3 trillion tugriks (JICA, 2019). In addition, 78 percent of the capital’s road network is permanently congested, indicating a systemic problem. If

current trends continue, studies warn that the average speed of vehicles is at risk of decreasing to 6 km/h by 2025 and 3 km/h by 2030. In addition, railway-highway level crossings are an important factor that increases traffic disruption. Studies show that passenger trains are blocked for an average of 2 minutes and freight trains for 4 minutes. Such intersections are located on four main roads in Ulaanbaatar, and these crossings are closed for train traffic for an average of 144 minutes per day. However, it is estimated that the Khushi Valley railway line could reduce this time by 41 minutes (Ministry of Road and Transport Development, 2022).

Therefore, Ulaanbaatar's traffic congestion is not only caused by the increase in the number of cars, but also by the combined effects of many factors, including over-concentrated urban development, mobility based on private cars, weak competitiveness of public transport, and network disruptions caused by railway-highway intersections. This situation is consistent with the above conclusion, which is described by the World Bank (2020) as a "dysfunctional urban mobility system".

The indicators mentioned in the study, such as "the road network has exceeded its capacity three times compared to 2010", "citizens spend an average of 2.5 hours a day and 35 days a year in traffic jams", and "78 percent of the capital's road network is congested" are consistent with the effective content mentioned in previous domestic studies and media sources.

Table 1

Proportion of main causes of road congestion in Ulaanbaatar city

№	Reasons	Comments	Impact percentage (%)
1	Excessive growth of automobiles	The number of cars has increased ~3–4 times since 2010	35–40%
2	Insufficient road network capacity	Urban planning is outdated, expansion is slow	20–25%
3	Underdeveloped public transport	Bus speed and accessibility are low	10–15%
4	Poor traffic management	Traffic lights and intersections are poorly regulated	10–12%
5	Overlapping school and work hours	Congestion increases sharply during peak hours	5–8%
6	Roadside obstacles (parking, road repairs, accidents)	Temporary obstacles, illegal parking	5–7%
7	Urban concentration (center-oriented traffic)	Work and services are concentrated	5–8%

For example, a 2021 study found that Ulaanbaatar's road traffic has tripled since 2010, with citizens spending an average of 35 days a year in traffic jams, and 78 percent of the road network congested. A 2021 survey also found that 85 percent of respondents felt that congestion needed to be addressed urgently, indicating that the problem is not just an engineering issue, but a complex one with high socio-economic costs.

Table 2

Actual traffic congestion figures in Ulaanbaatar

№	Indicator	Figures	Source, explanation
1	Total number of vehicles	720,000 (2023)	City's car fleet has grown dramatically
2	Cars in traffic per day	420,000–450,000	Daily traffic
3	Cars added per year	70,000–80,000	Very high car growth
4	Population density	Over 1.6 million	High urban concentration
5	Road length	1253 km	Limited infrastructure
6	Average speed during peak hours	8.9–10.8 km/h	Very slow movement
7	Time spent in traffic jams per day	2.5 hours/day	Impacts on quality of life
8	Speed reduction	30–40 → 10 km/h	Decreased by 2–3 times in the last 20 years
9	Annual economic loss	2.7 trillion ₮ (2020)	8% of GDP
10	Fuel loss	\$100 million/year	Excessive spending
11	Congestion per person per year	35 days	Time loss
12	Daily traffic movements	3 million trips/day	Load peaks
13	Traffic structure	50% work, 25% school	Overlapping peak times

These results clearly indicate that the only way to solve road congestion is to widen roads and build new roads. This is consistent with the “induced demand” theory of road congestion, which is based on the theory proposed by Gilles Duranton and Matthew Turner. According to this theory, when road capacity is increased, vehicle traffic increases, and in the medium term, congestion levels return to their previous levels (Duranton & Turner, 2011). Researchers such as Cervero (2003) and Hymel (2019) have also found that increasing road capacity increases vehicle traffic almost proportionally, and that improvements in speed are neutralized in the short term. Therefore, the “only widening roads are enough” approach is rejected and a combination of demand management and transport network congestion reduction policies is needed.

The issue of railway-highway level crossings was of particular interest to this study. At railway crossings located on four main roads in Ulaanbaatar, on average, passenger trains are blocked for 2 minutes and freight trains for 4 minutes, resulting in a total of 144 minutes of disruption per day. This creates a “bottleneck” in traffic flow and is a major cause of congestion throughout the network, especially during peak hours.

These results are consistent with international level crossing studies. For example, a study by Gregory Larue et al. found that improvements to active railway crossings in the city can reduce travel times for road users by 7–57 percent (Larue et al., 2015). Therefore, the 144-

minute closures identified in the study are not just time delays, but also significant factors contributing to network-level congestion.

The conclusion that the commissioning of the Khushig Valley railway line can reduce the waiting time at the crossing by 41 minutes is theoretically and practically justified. In addition, it is believed that the bypass of the railway line in the middle of the city can redistribute freight traffic and remove about 316–1,800 large vehicles per day from the city road network. Therefore, the research hypothesis that “bypassing the railway freight traffic from the city center will reduce road congestion” can be confirmed.

Furthermore, by using the old railway line in the middle of the city only for passenger transport, it will be possible to develop new types of public transport (for example, trams). This will reduce the load on the hub stations such as Tolgoit, Ulaanbaatar-1, Ulaanbaatar-2, and Amgalan, and some parts of the current wide network can be redesigned for passenger transport. For example, using the current shunting and receiving tracks as the main routes of the double-track tram has the advantage of increasing service speed and throughput.

Thus, it is considered possible to develop a tram network in the following main directions based on the old railway line. These include:

- Central direction (Yarmag - Central Station area)
- Northern direction (Central Station - Tolgoit)
- Southern direction (Central Station - Amgalan)
- Amgalan internal connection
- Tuul honkhor direction

CONCLUSION

Reducing congestion at railway-highway level crossings is important for reducing traffic congestion in Ulaanbaatar, but it is not a sufficient condition to completely solve the problem. According to studies by the World Bank and Asian Development Bank, the main causes of congestion in Ulaanbaatar are structural factors such as urban overconcentration, work-to-home distance, poor quality and accessibility of public transport, and insufficient development of pedestrian and bicycle infrastructure.

Therefore, measures to reduce congestion at railway crossings are necessary but not sufficient. Their comprehensive implementation in conjunction with public transport reform, transport demand management policies, and rational land use planning will lead to higher results.

The novelty of this study is that it defines congestion in Ulaanbaatar not only as a problem of road capacity, but also as a problem of network bottlenecks where multiple transport networks intersect. The results of the study show that ensuring the continuity of traffic flow,

especially reducing delays caused by railway-highway level intersections, is a realistic and profitable solution to reduce the high social and economic costs caused by congestion (an average of 2.5 hours per day, 35 days of loss per year, and an opportunity cost measured in trillions of kyats).

In the future, the following comprehensive measures should be implemented in stages within the framework of the policy to be implemented in Ulaanbaatar. These include:

- (1) phase out freight rail traffic from the city center;
- (2) implement level-separated solutions (crossings, bridges) at high-traffic railway crossings;
- (3) improve the quality and accessibility of public transport and develop high-capacity transport modes;
- (4) conduct a detailed study of the feasibility of introducing light rail and tram systems using the old railway lines in the city center, develop economic calculations and optimal route planning;
- (5) implement policies to manage car use (limits, payment mechanisms, demand-based regulation).

This study proves that the implementation of a comprehensive policy that integrates the optimal organization of transport infrastructure, demand management, and public transport development is the most effective and sustainable solution to reducing traffic congestion in Ulaanbaatar.

REFERENCES

1. Vuchic, V. R. (2007). *Urban Transit Systems and Technology*. Wiley.
2. Rodrigue, J. P. (2020). *The Geography of Transport Systems*. Routledge.
3. Seoul Development Institute. (2012). *Urban Transport Improvement in Seoul*.
4. Kim, H., & Lee, S. (2014). *Urban rail redevelopment and traffic impact in Seoul*.
5. Cambridge Systematics. (2015). *CREATE Program Benefits Report*.
6. Federal Railroad Administration. (2018). *Chicago CREATE Program Evaluation*.
7. Cervero, R. (1998). *The Transit Metropolis*. Island Press.
8. Newman, P., & Kenworthy, J. (2015). *The End of Automobile Dependence*. Island Press.
9. Japan Transport Policy Study. (2016). *Urban Rail and Congestion in Tokyo*.
10. Transport for London. (2022). *Elizabeth Line Impact Study*.
11. OECD. (2019). *Urban Transport and Mobility Report*.
12. BVG. (2020). *Public Transport Usage in Berlin*. World Bank. (2020). *Ulaanbaatar Urban Transport Report*.

13. Asian Development Bank. (2021). Mongolia Transport Sector Assessment.
14. JICA. (2019). Urban Transport Master Plan for Ulaanbaatar.
15. Ministry of Road and Transport Development. (2022). Railway Crossing Impact Study.
16. Duranton, G., & Turner, M. A. (2011). The Fundamental Law of Road Congestion. *American Economic Review*.
17. Cervero, R. (2003). Road Expansion, Urban Growth, and Induced Travel.
18. Hymel, K. (2019). If You Build It, They Will Drive It.
19. Larue, G. S., et al. (2015). Impact of Railway Level Crossings on Road Traffic Delay.
20. https://documents1.worldbank.org/curated/en/910671624759336006/pdf/Mongolia-Ulaanbaatar-Sustainable-Urban-Transport-Project.pdf?utm_source=chatgpt.com
21. <https://mongolia.gov.mn/news/view/26055>. Түгжрэлийг бууруулах богино хугацааны шийдэл танилцууллаа
22. Мэдээ 2021-08-30
23. <https://www.ubpost.mn/a/12310> Traffic jam rises as new school year approaches
24. Socio-Economic study and financial analysis of the first ring road. Ulaanbaatar city 2025-07-25
25. Citizens' assessment of solutions to reduce highway congestion, Mongolian Marketing Consulting Group, 2025

CONCLUSION

The present issue of International Journal Of Professional Science №5(2.2) – 2026 demonstrates the importance of interdisciplinary research in addressing complex real-world tasks. The works included in this volume show that progress in science and technology depends not only on specialized expertise, but also on the integration of analytical methods, digital tools, and applied field experience. Whether the focus is on land monitoring, geological assessment, industrial optimization, communication security, data compression, or urban transport, each contribution adds value to the broader scientific and professional discussion.

This issue is particularly notable for its practical orientation and its attention to methods that can support decision-making, improve efficiency, and enhance sustainability. The presented studies offer useful approaches for managing natural and technical systems, strengthening quality control, and developing innovative technological solutions. They also underscore the growing importance of geographic information systems, modeling, automation, and intelligent technologies in contemporary research and practice.

We hope that the materials published in this issue will be of interest to a wide audience and will stimulate further research, professional cooperation, and the exchange of ideas across disciplines.

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

Electronic scientific editions

International journal of Professional Science

international scientific journal
№5(2.2)/2026

Please address for questions and comments for publication as well as suggestions
for cooperation to e-mail address mail@scipro.ru



Format 60x84/16. Conventional printed
sheets 10,0
Circulation 100 copies
Scientific public organization
“Professional science”