



ИД «Академия Естествознания»

**УСПЕХИ
СОВРЕМЕННОГО
ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ**

Научный журнал

№ 2 2026



**ADVANCES
IN CURRENT
NATURAL SCIENCES**

Scientific journal

No. 2 2026



PH Academy of Natural History

Успехи современного естествознания

Научный журнал

Журнал издается с 2001 года.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство – ПИ № ФС 77-63398 от 16.10.2015.

«Успехи современного естествознания» – рецензируемый научный журнал, в котором публикуются статьи обладающие научной новизной, представляющие собой результаты завершённых исследований, проблемного или научно-практического характера, научные обзоры.

Журнал включен в действующий Перечень рецензируемых научных изданий (ВАК РФ). К2.

Журнал ориентирован на профессиональных работников сельского хозяйства, экологов, научных сотрудников, специалистов в смежных областях знаний, занимающихся изучением наук о земле.

Основные научные направления: 1.6. Науки о Земле и окружающей среде, 2.8. Недропользование и горные науки, 4.1. Агрономия, лесное и водное хозяйство.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Ледванов Михаил Юрьевич, д.м.н., профессор

Технический редактор

Доронкина Е. Н.

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Бизенкова Мария Николаевна, к.м.н.

Корректор

Галенкина Е. С.,
Дудкина Н. А.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.х.н., к.ф.-м.н., проф. *Алоев В. З.* (Нальчик); д.г.н., доцент *Андреева Е. С.* (Ростов-на-Дону); д.с.-х.н., доцент *Анищенко Л. Н.* (Брянск); д.т.н., проф. *Бейсембаев К. М.* (Караганда); д.б.н., доцент *Белоус О. Г.* (Сочи); д.г.-м.н., к.т.н., проф. *Бондарев В. И.* (Екатеринбург); д.т.н., профессор *Галкин А. Ф.* (Якутск); д.с.-х.н. *Горянин О. И.* (Самара); д.с.-х.н., доцент *Григорьев М. Ф.* (Кемерово); д.с.-х.н., проф. *Данилин И. М.* (Красноярск); д.х.н., проф. *Дресвянников А. Ф.* (Казань); д.с.-х.н., проф. *Залесов С. В.* (Екатеринбург); д.б.н., доцент *Захарченко А. В.* (Тюмень); д.г.-м.н., доцент *Копылов И. С.* (Пермь); д.с.-х.н., проф. *Костылев П. И.* (Зерноград); д.с.-х.н. *Коцарева Н. В.* (Белгород); д.б.н., проф. *Ларионов М. В.* (Саратов); д.ф.-м.н., проф. *Лерер А. М.* (Ростов-на-Дону); д.г.н., к.б.н., проф. *Луговской А. М.* (Москва); д.т.н., проф. *Мусаев В. К.* (Москва); д.с.-х.н. *Никитин С. Н.* (Ульяновск); д.с.-х.н., доцент *Сокольская О. Б.* (Саратов); д.т.н., проф. *Степанов В. В.* (Санкт-Петербург); д.т.н. *Теплухин В. К.* (Октябрьский); д.с.-х.н., проф. *Титов В. Н.* (Саратов); д.т.н., доцент *Ульрих Е. В.* (Кемерово); д.ф.-м.н., проф. *Ширанов Д. Ш.* (Улан-Удэ); д.г.-м.н., проф. *Юргенсон Г. А.* (Чита); д.г.н., проф. *Яковенко Н. В.* (Воронеж); д.т.н., проф. *Ямалетдинова К. Ш.* (Уфа).

ISSN 1681-7494

Электронная версия: <http://www.natural-sciences.ru>

Правила для авторов: <http://www.natural-sciences.ru/ru/rules/index>

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 0,976

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,458

Периодичность	12 номеров в год		
Учредитель, издатель и редакция	ООО ИД «Академия Естествознания»		
Почтовый адрес	105037, г. Москва, а/я 47		
Адрес редакции и издателя	440026, обл. Пензенская, г. Пенза, ул. Московская, влд. 27		
Типография	ООО «НИЦ Академия Естествознания» 410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, 5		
E-mail	edition@rae.ru	Телефон	+7 (499) 705-72-30
Подписано в печать	27.02.2026	Дата выхода номера	31.03.2026
Формат	60x90 1/8	Усл. печ. л.	12
Тираж	1000 экз.	Заказ	УСЕ 2026/2

Распространяется по свободной цене

© ООО ИД «Академия Естествознания»

Advances in current natural sciences

Scientific journal

The journal has been published since 2001.

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications. **Certificate – PI No. FS 77-63398** dated October 16, 2015.

«**Advances in current natural sciences**» is a peer-reviewed scientific journal that publishes articles of scientific novelty, which are the results of completed research, of a problematic or scientific-practical nature, scientific reviews.

The journal is included in the current List of peer-reviewed scientific publications (**HCC RF**). **K2**.

The journal is aimed at professional agricultural workers, environmentalists, researchers, specialists in related fields of study geosciences.

Main scientific directions: 1.6. Earth and environmental sciences, 2.8. Subsoil use and mining sciences, 4.1. Agronomy, forestry and water management.

CHIEF EDITOR

Ledvanov Mikhail Yurievich, Dr. Sci. (Medical), Prof.

Technical editor

Doronkina E. N.

EXECUTIVE SECRETARY

Bizenkova Maria Nikolaevna, Cand. Sci. (Medical)

Corrector

Galenkina E. S.,

Dudkina N. A.

EDITORIAL BOARD

D.Sc., C.Sc., Prof. *Aloev V.Z.* (Nalchik); D.Sc., Docent *Andreeva E.S.* (Rostov-on-Don); D.Sc., Docent *Anishchenko L.N.* (Bryansk); D.Sc., Prof. *Beisembaev K.M.* (Karaganda); D.Sc., Docent *Belous O.G.* (Sochi); D.Sc., C.Sc. Prof. *Bondarev V.I.* (Ekaterinburg); D.Sc., Prof. *Galkin A.F.* (Yakutsk); D.Sc. *Goryanin O.I.* (Samara); D.Sc., Docent *Grigoriev M.F.* (Kemerovo); D.Sc., Prof. *Danilin I.M.* (Krasnoyarsk); D.Sc., Prof. *Dresvyannikov A.F.* (Kazan); D.Sc., Prof. *Zalesov S.V.* (Ekaterinburg); D.Sc., Docent *Zakharchenko A.V.* (Tyumen); D.Sc., Docent *Kopylov I.S.* (Perm); D.Sc., Prof. *Kostylev P.I.* (Zernograd); D.Sc. *Kotsareva N.V.* (Belgorod); D.Sc., Prof. *Larionov M.V.* (Saratov); D.Sc., Prof. *Lerer A.M.* (Rostov-on-Don); D.Sc., C.Sc. Prof. *Lugovskoy A.M.* (Moscow); D.Sc., Prof. *Musaev V.K.* (Moscow); D.Sc. *Nikitin S.N.* (Ulyanovsk); D.Sc., Docent *Sokolskaya O.B.* (Saratov); D.Sc., Prof. *Stepanov V.V.* (Saint Petersburg); D.Sc. *Teplukhin V.K.* (Oktyabr'skiy); D.Sc., Prof. *Titov V.N.* (Saratov); D.Sc., Docent *Ulrich E.V.* (Kemerovo); D.Sc., Prof. *Shirapov D.Sh.* (Ulan-Ude); D.Sc., Prof. *Yurgenson G.A.* (Chita); D.Sc., Prof. *Yakovenko N.V.* (Voronezh); D.Sc., Prof. *Yamaletdinova K.Sh.* (Ufa).

ISSN 1681-7494

Electronic version: <http://www.natural-sciences.ru>

Rules for authors: <http://www.natural-sciences.ru/ru/rules/index>

Impact-factor RISQ (two-year) = 0,976

Impact-factor RISQ (five-year) = 0,458

Periodicity	12 issues per year
Founder, publisher and editors	LLC PH Academy of Natural History
Mailing address	105037, Moscow, p.o. box 47
Editorial and publisher address	440026, Penza region, Penza, Moskovskaya st., bldg. 27
Printing house	LLC SPC Academy of Natural History 410035, Saratov, st. Mamontova, 5
E-mail	edition@rae.ru
Signed for print	27.02.2026
Format	60x90 1/8
Circulation	1000 copies
Telephone	+7 (499) 705-72-30
Number issue date	31.03.2026
Conditionally printed sheets	12
Order	YCE 2026/2

Distribution at a free price

© LLC PH Academy of Natural History

СОДЕРЖАНИЕ

Сельскохозяйственные науки (4.1.1 Общее земледелие и растениеводство)

СТАТЬИ

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННОЙ РОБОТОТЕХНИКИ
В ТОЧНОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ

Габдуллина Э. Р., Саитова Г. А., Сильнова С. В.8

СТИМУЛИРУЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ ЛЕКТИНОВ МИКРОМИЦЕТОВ РОДА
ALTERNARIA НА СЕМЕНА И ПРОРОСТКИ ПШЕНИЦЫ

Зинуров М. Р., Зинурова Е. Е., Багаева Т. В.15

Географические науки (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

СТАТЬИ

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ СЕЛИТЕБНОГО ОСВОЕНИЯ
ГЕОСИСТЕМ МОРДОВИИ

Вавилин Н. А.21

ОЦЕНКА АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ КЛИМАТИЧЕСКИХ
ИЗМЕНЕНИЙ И ИХ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ
В РЕГИОНАХ ЮЖНОЙ РОССИИ

Лазовский А. И., Можяев Е. Е.29

Геолого-минералогические науки (1.6.3, 1.6.5, 1.6.6, 1.6.10, 1.6.12, 1.6.17, 1.6.21)

СТАТЬИ

ОСОБЕННОСТИ ЗОНИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ В ЗАДАЧАХ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА

Лавренчук В. А.37

РАЗРАБОТКА НОВОГО ПОДХОДА К ВЫЯВЛЕНИЮ НЕГАТИВНЫХ
ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ СРЕДЫ С УЧЕТОМ
ИНТЕГРИРОВАННЫХ ДАННЫХ О ТРАНЗИТНЫХ ТАЛЬВЕГАХ
И РОТАЦИИ ЗЕМЛИ

Соколова Н. В.50

Технические науки (1.6.7, 1.6.9, 1.6.16, 2.8.1, 2.8.6, 2.8.7, 2.8.9)

СТАТЬИ

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ
МЕТАЛЛОВ В ВОДАХ РЕКИ НАРЫН (2020–2024 ГОДЫ)

Алиева Э. А., Оторова С. Т., Тотубаева Н. Э.60

ОЧИСТКА ПРИРОДНОЙ ВОДЫ РЕКИ КАЗЫМ НА ОЧИСТНЫХ
СООРУЖЕНИЯХ ГОРОДА БЕЛОЯРСКИЙ

Качалова Г. С. 70

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

НЕЙРОННЫЕ СЕТИ В ЗАДАЧАХ ФЛОТАЦИИ МИНЕРАЛЬНОГО
СЫРЬЯ: СХЕМА ВЫБОРА АРХИТЕКТУРЫ ПО ТИПУ ДАННЫХ
И ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧИ

Александрова Т. Н., Гатиатуллин Б. Л. 77

Физико-математические науки (1.6.22)

СТАТЬЯ

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГЕОПРИВЯЗКИ СНИМКОВ БЕСПИЛОТНЫХ
АППАРАТОВ АЭРОФОТОСЪЕМКИ БАЗОВЫМИ СТАНЦИЯМИ
ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Насереддин Х. Х., Акель М. А. 84

CONTENTS

Agricultural Sciences (4.1.1 General Agriculture and Plant Growing)

ARTICLES

PROSPECTS FOR USING MODERN ROBOTICS IN PRECISION AGRICULTURE

Gabdullina E. R., Saitova G. A., Silnova S. V.8

STIMULATING EFFECT OF MICROMYCETES LECTINS OF THE GENUS *ALTERNARIA* ON WHEAT SEEDS AND SEEDLINGS

Zinurov M. R., Zinurova E. E., Bagaeva T. V.15

Geographical sciences (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

ARTICLES

GEOINFORMATION ANALYSIS OF RESIDENTIAL DEVELOPMENT OF THE GEOSYSTEMS OF MORDOVIA

Vavilin N. A.21

ASSESSMENT OF ANTHROPOGENIC FACTORS OF CLIMATE CHANGE AND THEIR GEOECOLOGICAL CONSEQUENCES IN THE REGIONS OF SOUTHERN RUSSIA

Lazovskiy A. I., Mozhaev E. E.29

Geological and mineralogical sciences (1.6.3, 1.6.5, 1.6.6, 1.6.10, 1.6.12, 1.6.17, 1.6.21)

ARTICLES

FEATURES OF ZONING OF DANGEROUS GEOECOLOGICAL PROCESSES IN GEOECOLOGICAL MONITORING OF OIL AND GAS DEPOSITS

Lavrenchuk V. A.37

DEVELOPMENT OF A NEW APPROACH TO IDENTIFYING NEGATIVE GEODYNAMIC ENVIRONMENTAL FACTORS TAKING INTO ACCOUNT INTEGRATED DATA ON TRANSIT THALWEGS AND EARTH ROTATION

Sokolova N. V.50

Technical sciences (1.6.7, 1.6.9, 1.6.16, 2.8.1, 2.8.6, 2.8.7, 2.8.9)

ARTICLES

SPATIAL AND TEMPORAL CHANGES IN METAL CONCENTRATIONS IN THE NARYN RIVER (2020–2024)

Alieva E. A., Otorova S. T., Totubaeva N. E.60

PURIFICATION OF THE NATURAL WATER OF THE KAZYM RIVER
AT THE SEWAGE TREATMENT PLANTS OF THE CITY OF BELOYARSK

Kachalova G. S.70

REVIEW

NEURAL NETWORKS IN RAW MINERAL MATERIAL
FLOTATION TASKS: ARCHITECTURE SELECTION SCHEME
BASED ON DATA TYPE AND PROBLEM STATEMENT

Aleksandrova T. N., Gatiatullin B. L.77

Physical and mathematical sciences (1.6.22)

ARTICLE

IMPROVING THE ACCURACY OF GEO-TAGGING AERIAL
PHOTOGRAPHS FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES
USING GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM BASE STATIONS

Nasereddin Kh. Kh., Akel M. A.84

СТАТЬИ

УДК 631.3:004.89
DOI 10.17513/use.38473



CC BY 4.0

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННОЙ РОБОТОТЕХНИКИ В ТОЧНОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ

Габдуллина Э. Р. ORCID ID 0000-0002-2421-1510,
Сайтова Г. А. ORCID ID 0009-0008-3535-3435,
Сильнова С. В. ORCID ID 0000-0002-0732-306X

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа,
Российская Федерация, e-mail: gabdullina.er@mail.ru*

В настоящее время в России и за рубежом стремительно развивается робототехника, в том числе в сельскохозяйственной отрасли. Появляются технические решения в форме мобильных роботизированных платформ – агроботов, способных перемещаться и выполнять различные сельскохозяйственные задачи за счет автоматизации рутинных и трудоемких агротехнических операций, что позволяет значительно повысить эффективность сельхозпроизводства. При разработке агроботов особую актуальность приобретает использование систем интеллектуального управления и компьютерного зрения. Целью статьи является обзор агроботов, разрабатываемых российскими и зарубежными компаниями. Материалами исследования являются результаты сравнительного анализа агроботов, их функциональных возможностей и масштаба применения в различных сельскохозяйственных работах. На основе полученных материалов определены основные конструктивные элементы агроботов и составляющие программно-аппаратного комплекса, предназначенного для управления агроботом. Программно-аппаратный комплекс включает системы навигации, распознавания объектов на основе компьютерного зрения, позиционирования и управления навесным оборудованием. Как актуальное и перспективное направление использования агроботов выделена задача качественной прополки сорных растений. Приведена классификация различных способов борьбы с сорняками с указанием их достоинств и недостатков с точки зрения решения практических агротехнических задач. Способы, применяемые в современной агробототехнике, описаны более подробно.

Ключевые слова: агробот, сельское хозяйство, программно-аппаратный комплекс, автономное движение, позиционирование, навесное оборудование, искусственный интеллект, компьютерное зрение, точное земледелие

PROSPECTS FOR USING MODERN ROBOTICS IN PRECISION AGRICULTURE

Gabdullina E. R. ORCID ID 0000-0002-2421-1510,
Saitova G. A. ORCID ID 0009-0008-3535-3435,
Silnova S. V. ORCID ID 0000-0002-0732-306X

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Ufa State Aviation Technical University”, Ufa, Russian Federation,
e-mail: gabdullina.er@mail.ru*

Robotics is rapidly developing in Russia and abroad, including in the agricultural sector. Technical solutions are emerging in the form of mobile robotic platforms – agri-robots – that can navigate and perform various agricultural tasks by automating routine and labor-intensive agricultural operations, significantly increasing the efficiency of agricultural production. Intelligent control systems and computer vision are particularly important in the development of agri-robots. The aim of the article is to review agri-robots being developed by Russian and foreign companies. The research materials include the results of a comparative analysis of agri-robots, their functional capabilities, and the scale of their application in various agricultural operations. Based on these materials, the key design elements of agricultural robots and the components of the hardware and software system designed to control them were identified. This hardware-software complex includes navigation systems, object recognition systems based on computer vision, positioning systems, and systems for managing attached equipment. The task of high-quality weeding of undesirable plants is highlighted as a relevant and promising area for the use of agri-robots. A classification of various weed control methods is provided, outlining their advantages and disadvantages from the perspective of solving practical agricultural tasks. The methods used in modern agricultural robotics are described in more detail.

Keywords: agri-robots, agriculture, hardware and software systems, autonomous movement, positioning, attachments, artificial intelligence, computer vision, precision farming

Введение

Современные IT-тренды, такие как использование больших данных, интернета вещей (IoT), роботизированных технологий и искусственного интеллекта (AI), откры-

вают новые возможности для повышения эффективности и устойчивости развития агропромышленного комплекса (АПК). В распоряжении Правительства РФ [1] выделены следующие основные проблемы текущего

состояния сельскохозяйственной отрасли, решаемые с помощью цифровизации: высокий уровень дефицита на рынке труда специалистов в сфере АПК; недостаточное развитие цифровой инфраструктуры; отсутствие единой цифровой площадки получения отраслевых данных; недостаточная точность данных в АПК; высокая капиталоемкость мероприятий цифровой трансформации АПК.

В соответствии с Распоряжением в ходе реализации Стратегического направления в АПК, в том числе в сельском хозяйстве, должны быть внедрены следующие технологии для повышения эффективности производственных процессов сельхозпредприятий: беспилотная сельскохозяйственная техника и робототехника; искусственный интеллект, в том числе машинное обучение, компьютерное зрение; интернет вещей; спутниковые системы связи и позиционирования и т. д. Целями цифровой трансформации АПК являются достижение продовольственной безопасности, повышение эффективности производственных процессов в АПК. Установлено, что самыми востребованными сервисами цифровизации у сельхозтоваропроизводителей являются инструменты точного земледелия и точного животноводства.

В условиях цифровизации и технологического обновления сельхозпредприятий особую актуальность приобретает внедрение интеллектуальных систем управления сельскохозяйственной техникой [2–4]. Для повышения эффективности проведения сельскохозяйственных работ в России и за рубежом появляются технические решения в форме мобильных роботизированных платформ – агроботов, способных перемещаться и выполнять различные сельскохозяйственные задачи в соответствии с технологией точного земледелия либо автономно, либо при дистанционном управлении [5–6]. Такие технические решения способны значительно повысить эффективность сельхозпроизводства за счет автоматизации рутинных и трудоемких агротехнических операций, таких как посев семян, анализ состояния посевов и почвы, выявление болезней, оценка урожайности, внесение удобрений по технологии точного земледелия, обработка от вредителей, уничтожение сорняков различными методами, сбор и транспортировка урожая. Это позволит обеспечить снижение затрат (трудозатраты, расход удобрений) и минимизировать воздействие на окружающую среду (сокращение пестицидов, экономия воды) [7, 8]. Таким об-

разом, развитие и внедрение агроботов полностью соответствует стратегическим целям, обсуждаемым на федеральном и региональном уровнях управления АПК.

Цель исследования – систематизация и анализ существующих разработок агроботов, созданных российскими и зарубежными компаниями для применения в точном земледелии.

Материалы и методы исследования

Одним из ведущих отечественных разработчиков в данной области является компания Cognitive Pilot (<https://cognitivepilot.com/>), специализирующаяся на создании систем автономного вождения на базе искусственного интеллекта. Компанией разработана интеллектуальная система Cognitive Agro Pilot, предназначенная для автоматизированного управления (автопилотирования) сельскохозяйственными машинами (зерноуборочными и кормоуборочными комбайнами, тракторами, опрыскивателями) в средних и крупных агропромышленных комплексах (от 1000 га).

Компанией Avrora Robotics (<https://avrora-robotics.com/ru/>) и Рязанским государственным радиотехническим университетом разрабатывается проект «Агробот» (<https://avrora-robotics.com/ru/projects/agrobot/>), представляющий собой системы беспилотного управления для сельскохозяйственной техники и линейку сельхозмашин, предназначенных для автоматизации различных агротехнических операций; в рамках проекта также разработан колесный беспилотный роботрактор.

Резидент «Сколково» компания «Гумич РТК» разрабатывает наземные сельскохозяйственные роботы «Агробот» (<https://gumich-rtk.ru/roboty/agrobot/>) на гусеничной платформе разных габаритов, позволяющие менять функционал путем установки различных навесных модулей для мониторинга, опрыскивания, перевозки грузов, зарядки дронов и т. д.

В области интеллектуального управления агроботами в России появляются патенты, связанные с разработкой мобильных робототехнических платформ систем автономного управления сельхозтехникой, в том числе на основе данных компьютерного зрения, – например «Робот-пропольщик с функцией фертигации», № 2694588, 2019 г., ФГБОУ ВО «Волгоградский ГАУ»; «Беспилотный робот-пропольщик», № 2766888, 2021 г., ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет».

**Современные решения в области разработки
автономных мобильных робототехнических платформ**

Платформа	Краткая характеристика	Масштаб применения	Особенности функционала	Стоимость
Cognitive Agro Pilot	Интегрируется с существующей сельхозтехникой	Большие поля, крупные сельхозпредприятия	Позволяет автоматизировать существующий парк техники, повышает эффективность	3–5 млн руб.
«АгроБот» Avrora Robotics	Электрический, на колесном шасси, с высоким клиренсом	Средние и большие поля, универсальное применение	Высокая проходимость, модульность	5–15 млн руб.
«Гумич РТК»	Электрический /дизельный, гусеничное шасси	Большие поля, крупные сельхозпредприятия	Высокая точность вождения, простота в установке, повышение производительности техники	1–4 млн руб.
Naïo Technologies	Электрический (аккумуляторные батареи), колесное шасси	Малые и средние поля, овощеводство, виноградарники	Экологичность, снижение трудозатрат, бережное отношение к почве	7–15 млн руб.
FarmDroid	Электрический (солнечные батареи), легкое колесное шасси	Малые и средние поля, овощеводство, сахарная свекла	Использует солнечную энергию, очень легкий, работает без оператора, очень точный посев и прополка, отсутствие химии	6–8 млн руб.
Carbon Robotics (LaserWeeder)	Электрический (аккумуляторные батареи), колесное шасси	От малых роботизированных систем до управления техникой на полях среднего размера	Отсутствие гербицидов, избирательность, высокая скорость работы, снижение затрат на прополку, эффективность	15–20 млн руб.

Примечание: составлена авторами на основе данных, полученных в ходе исследования.

Активно развиваются зарубежные разработки мобильных агротехнических роботизированных платформ с широким спектром навесного оборудования для реализации технологии точного земледелия [9–11]. Например, французская компания Naïo Technologies (<https://www.naio-technologies.com/en/home/>) разрабатывает целую линейку «легких» и «тяжелых» роботов с универсальными держателями различных инструментов (в том числе для удаления сорняков); датская компания FarmDroid (<https://farmdroid.com/>) разрабатывает многоцелевые (прополочно-посевные) агроэлектрические роботы FarmDroid FD20, которые осуществляют как посев, так и междурядную и внутрирядную механическую прополку с высокой точностью; американская компания Carbon Robotics (<https://carbonrobotics.com/>) – автономный комбайн Carbon Robotics LaserWeeder с использованием лазеров для уничтожения сорняков.

В таблице представлена сводная информация по результатам проведенного анализа современных решений в области разработки автономных мобильных робототехнических платформ.

Результаты исследования и их обсуждение

Для замены ручного труда производителями в России и за рубежом разрабатываются агроботы с автономным движением на основе интеллектуального управления, которые включают: мобильную платформу; программно-аппаратный комплекс (ПАК), состоящий из программного обеспечения и аппаратной части; подсистему интеллектуального управления автономным движением агробота; подсистему управления позиционированием дополнительных устройств (навесного оборудования); подсистему компьютерного зрения.

Программное обеспечение ПАК включает в себя алгоритмы, интерфейсы, управляющие модули:

- операционную систему для роботов ROS (Robot Operating Systems)/ROS2;

- алгоритмы и фреймворки компьютерного зрения OpenCV – для обработки изображений и видео, TensorFlow, PyTorch, Keras – для обучения нейросетей, CNN – для распознавания и классификации изображений;

– навигационные системы SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) – алгоритмы, позволяющие роботу одновременно строить карты неизвестной окружающей среды и определять свое местоположение на местности;

– подсистемы управления и контроля, такие как программное обеспечение для программирования промышленных контроллеров, отвечающих за низкоуровневое управление двигателями; программное обеспечение для микроконтроллеров, а также для систем безопасности;

– операторский интерфейс HMI (Human-Machine Interface).

Аппаратную часть составляют RGB, мультиспектральные, инфракрасные камеры, датчики расстояния (лидары) для измерения расстояний до объектов, GPS/ГЛОНАСС-приемники для определения местоположения робота в поле, инерциальные измерительные блоки для измерения угловой скорости, ускорения и ориентации (тангаж, крен) робота, датчики для мониторинга растений, почвы, встраиваемые вычислительные контроллеры, программируемые логические контроллеры, микроконтроллеры, контроллеры движения, системы управления питанием, модули беспроводной связи.

Подсистема интеллектуального управления автономным движением агробота разрабатывается для перемещения по рельефной местности с возможностью дистанционного управления, преодоления или обхода препятствий и адаптации к меняющимся условиям (без прямого участия человека). Для определения текущего положения робота, навигации, планирования оптимальных маршрутов, идентификации препятствий используются алгоритмы искусственного интеллекта и машинного обучения.

Подсистема управления позиционированием дополнительных устройств относится к точному управлению навесным оборудованием (например, опрыскивателем для точного внесения удобрений, дозатором для внесения энтомофагов, лазером для прополки) и осуществляется за счет использования методов AI-распознавания.

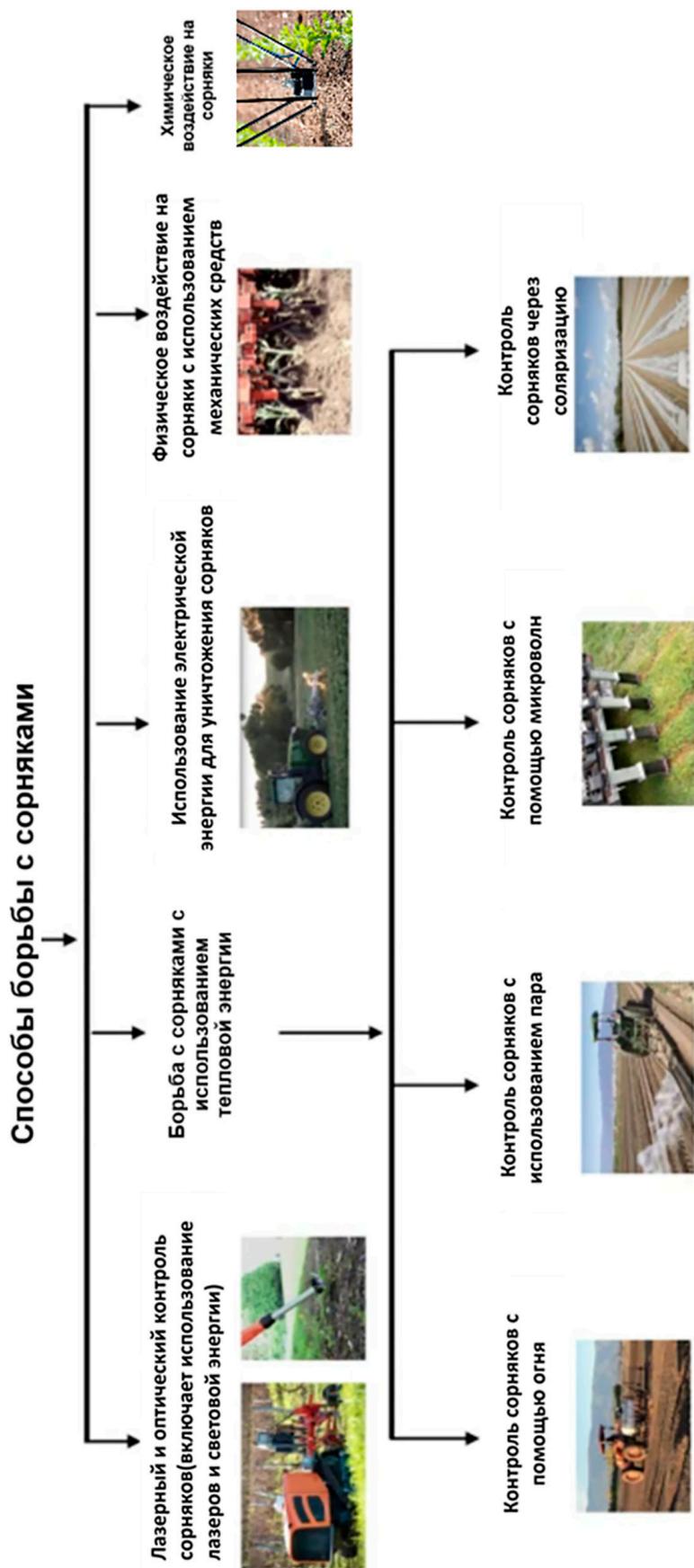
Подсистема компьютерного зрения, предназначенная для распознавания растений, позволяет агроботу «понимать» окружающую среду, что особенно важно для решения задач идентификации растений (сорняки/культурное растение), обнаружения болезней, вредителей, для обнаружения препятствий. Данная подсистема разрабатывается с помощью моделей нейросетевой

классификации, построенных на основе мониторинга и сбора данных с лидаров, датчиков, камер.

К сожалению, в настоящее время практически все сельхозпредприятия для повышения своей экономической эффективности используют химические средства обработки и защиты растений, которые могут накапливаться в сельхозпродукции и негативно влиять на экологическое состояние окружающей среды, здоровье людей и животных. Для снижения пестицидной нагрузки и производства экологической продукции используются технологии органического земледелия, основанные на применении биопрепаратов; при этом для уничтожения сорняков традиционно используется ручная или механизированная прополка, которая является наиболее экологически безопасной, но очень трудоемкой операцией.

В условиях стремительной модернизации сельскохозяйственной отрасли актуальным и перспективным направлением является разработка агроботов, которые интегрируют интеллектуальные технологии прополки и распознавания растений; такие роботы предназначены для реализации принципов органического земледелия и позволят сельхозпредприятиям выпускать экологически чистую продукцию [12]. На рисунке представлены основные способы уничтожения сорняков с помощью интеллектуальных агроботов (все изображения находятся в открытом доступе) [13].

Лазерная прополка уничтожает сорняки лазерными лучами с использованием лазерного оборудования [14, 15]. Направленный на сорняки лазерный луч нагревает растительную ткань, что приводит к повреждению или гибели растения. Воздействие лазеров на сорняки зависит от оптической мощности, времени воздействия, размера пятна и длины волны λ лазера. Различают «синие» диодные лазеры ($\lambda = 400\text{--}500$ нм) и «красные» лазеры на углекислом газе (CO_2) ($\lambda = 650\text{--}660$ нм). Эффективность прополок диодными лазерными системами обусловлена высоким поглощением длины волны лазера на целлюлозе и хлорофилле растения, используемого в кислородном фотосинтезе. Прополка синим лазером требует более низкой оптической мощности для эффективного удаления нежелательных растений. При борьбе с сорняками «красным» лазером CO_2 процесс прополки похож на эффект электрических и термических прополочных устройств, при котором растение обезвоживается или кипит заживо.



*Способы борьбы с сорняками
Примечание: составлен авторами на основе источника [13]*

Это связано с тем, что лазеры CO₂ очень сильно поглощают воду и практически не могут проходить сквозь нее, не испаряя ее. К сожалению, лазеры CO₂ тратят 95% поставляемой электроэнергии в виде тепла и требуют, чтобы это тепло обрабатывалось надежными системами охлаждения.

Способ борьбы с использованием тепловой энергии использует прямое внешнее интенсивное тепло для уничтожения сорняков от пламени, горячего пара, масла, микроволн, солнца. Тепло передается через сорняк, вызывая обезвоживание растения и разрыв клеточной стенки, что влечет увядание растения за время от нескольких часов до нескольких дней. Такая обработка может потребовать многократного применения, поскольку корни сорняков могут побудить рост новых стеблей. Термическая прополка, удаляя сорняки, уничтожает также бактерии и насекомых, не различая вредных и полезных.

Интеллектуальная механическая прополка позволяет выделять среди зеленой массы растений сорняки и управлять механическими приводами прополочных устройств для удаления сорняков не только в междурядьях, но и внутри рядов.

Способ химической прополки – это удаление сорняков с помощью гербицидов, которые вызывают увядание и гибель сорняков: воздействуют на дыхание, фотосинтез, рост или подавляют прорастание семян. Интеллектуальная химическая прополка использует технологии машинного зрения для обнаружения сорных и культурных растений. Точечное опрыскивание реализуется следующим образом: при движении робота размещенные на опрыскивателе датчики сканируют растения, в режиме реального времени происходит распознавание сорняков; форсунки распыляют строго заданное количество химического раствора в точно определенном месте. Данная технология имеет высокую эффективность прополки за счет резкого сокращения затрат на гербициды.

Электрическая прополка – это процесс уничтожения клеток растений короткими импульсами электричества высокого напряжения; для полного удаления сорняков требуется большое время контакта со стеблями, листьями или корнями; для полного уничтожения сорняков применяется технология импульсного электрического микрошока, основанная на методах искусственного интеллекта, со сверхнизким потреблением энергии.

Заключение

Обзор современных технических решений в области агробототехники показал, что на российском рынке в последнее время появились технологии автономного движения сельхозтехники и автоматического управления агротехническими операциями, однако в основном рассчитанные на использование в крупных агрохолдингах. При этом существующие зарубежные аналоги на российском рынке либо недоступны, либо дороги. В связи с этим количество и разнообразие реализованных технических решений не в полной мере охватывает необходимые потребности сельхозпредприятий РФ, имеется востребованность отечественных разработок в этой области. Разнообразное навесное оборудование мобильных роботизированных платформ позволяет решать различные проблемы точного земледелия. Особое внимание следует уделять важной задаче борьбы с сорняками, поскольку именно на этапе развития зеленой массы аграрных культур обеспечивается их урожайность. Каждый из методов прополки сорняков с помощью интеллектуальных роботов, приведенных в настоящем обзоре, имеет специфику, которую важно учитывать при практическом применении. Дальнейшее развитие агробототехники, совершенствование ее технологий позволит сделать такие подходы экономически оправданными и экологически безопасными.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ № 3971-р от 29 декабря 2021 г. «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации отраслей агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года» // Официальный интернет-портал правовой информации [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202112310100> (дата обращения: 24.10.2025).
2. Колодина К. А., Адамов И. М., Драгуленко В. В. Технологические тренды цифровизации сельского хозяйства и успешные примеры их реализации // Региональная и отраслевая экономика. 2024. № 6. С. 41–46. DOI: 10.47576/2949-1916.2024.6.6.005.
3. Бойко А. Участники рынка сельскохозяйственных роботов // Материалы информационного портала о трендах робототехнических систем. [Электронный ресурс]. URL: <https://robotrends.ru/robopedia/uchastniki-rynka-selskohozyaystvennyh-robotov> (дата обращения: 24.10.2025).
4. Положихина М. А. Новая индустриализация сельского хозяйства: направления, возможности и риски // Экономические и социальные проблемы России. 2025. № 2. С. 12–51. DOI: 10.31249/espr/2025.02.01.
5. Саитова Г. А., Габдуллина Э. Р. Методика определения проективного покрытия полей на основе дистанционного мониторинга // Системная инженерия и информационные технологии. 2025. Т. 7. № 2 (21). С. 48–55. DOI: 10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no2-p48.

6. Saitova G. A., Elizarova A. V. Intelligent system for data analysis and decision-making on test results // *Journal of Physics: Conference Series*: 13 (Санкт-Петербург, 06–08 октября 2020 г.). Saint Petersburg, 2021. P. 012134. DOI: 10.1088/1742-6596/1864/1/012134. EDN: CIZTGW.
7. Karamzina A., Silnova S. Quality Estimation of Electronic Educational Resources // 2nd International Conference on Technology Enhanced Learning in Higher Education (TELE), Lipetsk, 2022. P. 17–22. DOI: 10.1109/TELE55498.2022.9801004. EID: 2-s2.0-85134168041.
8. Пугин А. М., Сaitова Г. А., Габдуллина Э. Р. Система поддержки принятия решений по управлению процессами точного земледелия с использованием цифровых технологий // *Современные наукоемкие технологии*. 2022. № 10–2. С. 226–230. DOI: 10.17513/snt.39374.
9. Панарин Р. Н., Соловьев А. А., Хворова Л. А. Применение технологий искусственного интеллекта и компьютерного зрения при решении задач автоматизации обработки и распознавания биологических объектов // *Известия Алтайского государственного университета*. 2022. № 1 (123). С. 101–107. DOI: 10.14258/izvasu(2022)1-16.
10. Романов П. С., Романова И. П. Перспективы применения роботов для прополки сорняков для повышения экономической эффективности в растениеводстве // *Научное обеспечение инновационного развития сельского хозяйства: Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием (Махачкала, 25–26 апреля 2024 г.)*. Махачкала: Издательство АЛЕФ, 2024. С. 97–101. DOI: 10.25691/7239.2024.64.39.029. EDN: HQOBXH.
11. Silnova S., Karamzina A. Data mining for quality management of working out detailed design documentation development in a project organization // 3rd International conference on control systems, mathematical modeling, automation and energy efficiency, SUMMA 2021, Lipetsk. 2021. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (New York). 2021. Vol. 3. P. 387–391. DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632039.
12. Barbosa Junior M. R. et al. Advancements in agricultural ground robots for specialty crops: an overview of innovations, challenges, and prospects // *Plants*. 2024. Vol. 13. № 23. P. 3372. DOI: 10.3390/plants13233372.
13. Zhang H. et al. Laser and optical radiation weed control: a critical review // *Precision agriculture*. 2024. Vol. 25. Is. 4. P. 2033–2057. DOI: 10.1007/s11119-024-10152-x.
14. Jiao J., Zang Y., Chen C. Key Technologies of Intelligent Weeding for Vegetables: A Review // *Agriculture*. 2024. Vol. 14. Is. 8. P. 1378. DOI: 10.3390/agriculture14081378.
15. Wang C. et al. Precision Weeding in Agriculture: A Comprehensive Review of Intelligent Laser Robots Leveraging Deep Learning Techniques // *Agriculture*. 2025. Vol. 15. Is. 11. P. 1213. DOI: 10.3390/agriculture15111213.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

СТИМУЛИРУЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ ЛЕКТИНОВ МИКРОМИЦЕТОВ РОДА *ALTERNARIA* НА СЕМЕНА И ПРОРОСТКИ ПШЕНИЦЫ

¹Зинуров М. Р., ²Зинурова Е. Е. ORCID ID 0000-0002-6639-2524,

³Багаева Т. В. ORCID ID 0000-0002-1672-5052

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Российская Федерация;

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова» Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский университет), Москва, Российская Федерация;

³Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Казань, Российская Федерация, e-mail: tatbag@rambler.ru

Спектр ростостимулирующих препаратов на рынке сегодня достаточно широк. Однако поиск новых форм остается на высоком уровне. Известно, что в механизмах прорастания и созревания семян задействованы эндогенные лектины растений. В то же время было показано, что подобными свойствами обладают и лектины некоторых микроорганизмов, преимущественно бактерий. Взаимодействие растительных организмов возможно и с лектинами микромицетов. Предварительное выдерживание семян зерновых культур в лектинсодержащих растворах может оказать положительное влияние на их всхожесть и развитие растения в целом. Цель работы – установить наличие влияния лектинов микромицетов на семена зерновых культур на примере пшеницы и оценить степень данного действия. В качестве продуцента лектинов использовали штамм микромицета *Alternaria alternata* 4 музея кафедры биотехнологии, института фармации им. А. П. Нелюбина Первого МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России. Нарращивание биомассы микромицета проводили на среде из картофельного отвара с глюкозой, в термостате при температуре 28 °С. Выделение лектинов осуществляли на 6-е сутки по стандартной методике. Для обработки были выбраны семена озимой пшеницы сорта «Казанская 560». Семена выдерживались в лектинсодержащих растворах разных концентраций. Впервые получены данные о влиянии лектинов микромицетов рода *Alternaria* на энергию прорастания, всхожесть и развитие пшеницы. Установлен диапазон концентраций лектина, оказывающих ростостимулирующее действие. Показано, что ростостимулирующее действие лектинов имеет дозозависимый характер. Установлено положительное влияние лектинов микромицета *Alternaria alternata* 4 на морфометрические показатели корней и проростков пшеницы. Установлено, что предварительное выдерживание семян в лектинсодержащих растворах *Alternaria alternata* 4 оказывает положительное влияние на энергию прорастания, всхожесть и развитие пшеницы. Установлен диапазон концентраций лектина, способствующих ростостимулирующему действию.

Ключевые слова: лектины, микромицеты, *Alternaria alternata*, зерновые культуры, пшеница, ростостимулирующая активность

STIMULATING EFFECT OF MICROMYCETES LECTINS OF THE GENUS *ALTERNARIA* ON WHEAT SEEDS AND SEEDLINGS

¹Zinurov M. R., ²Zinurova E. E. ORCID ID 0000-0002-6639-2524,

³Bagaeva T. V. ORCID ID 0000-0002-1672-5052

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kazan National Research Technological University”, Kazan, Russian Federation;

²Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education First Moscow State Medical University named after I. M. Sechenov” of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), Moscow, Russian Federation;

³Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Kazan (Volga Region) Federal University”, Kazan, Russian Federation, e-mail: tatbag@rambler.ru

The range of growth-stimulating drugs on the market today is quite wide. However, the search for new forms remains at a high level. It is known that endogenous plant lectins are involved in the mechanisms of germination and maturation of seeds. At the same time, it has been shown that the lectins of some microorganisms, mainly bacteria, possess similar properties. The interaction of plant organisms is also possible with micromycete lectins. Pre-aging of seeds of grain and vegetable crops in lectin-containing extracts can have a positive effect on their germination and the development of the plant as a whole. The aim of the work is to establish the effect of micromycete lectins on grain seeds using wheat as an example and to assess the degree of this effect. A strain of the micromycete *Alternaria alternata* 4 from the Museum of the Department of Biotechnology, the A. P. Nelyubin Institute of Pharmacy,

and the Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation was used as a producer of lectins. The biomass of the micromycete was increased on a medium of potato broth with glucose, in a thermostat at a temperature of 28 °C. Lectins were isolated on day 6 according to the standard procedure. Winter wheat seeds of the «Kazanskaya 560» variety were selected for processing. The seeds were aged in lectin-containing extracts of different concentrations. For the first time, data have been obtained on the effect of micromycete lectins of the genus *Alternaria* on germination energy, germination and development of wheat. A range of lectin concentrations that have a growth-stimulating effect has been established. It has been shown that the growth-stimulating effect of lectins is dose-dependent. The positive effect of the micromycete *Alternaria alternata* 4 lectins on the morphometric parameters of wheat roots and seedlings has been established. It has been established that the pre-aging of seeds in lectin-containing extracts of *Alternaria alternata* 4 has a positive effect on the germination energy, germination and development of wheat, a range of lectin concentrations contributing to the growth-stimulating effect has been established.

Keywords: lectins, micromycetes, *Alternaria alternata*, grain crops, wheat, growth-stimulating activity

Введение

Одно из основных направлений биологизации сельского хозяйства связано с поиском новых продуцентов и биопрепаратов, направленных на увеличение продуктивности сельскохозяйственно значимых культур. Несмотря на многообразие известных стимуляторов роста растений, этот вопрос остается одним из приоритетных, поскольку связан с продовольственной безопасностью и защитой окружающей среды.

Среди различных ростостимулирующих препаратов наиболее часто рассматриваются препараты, функционирующие на основе бактерий. Среди них такие препараты, как Фитоспорин, Ризобакт, Биофил, Агрофил и др. [1].

Новым направлением в поиске ростостимулирующих препаратов являются исследования, связанные с использованием лектинов микроорганизмов. Лектины – это белки или гликопротеины, обладающие гемагглютинирующей активностью, способные к взаимодействию с поверхностными структурами клеток. Для лектинов показано, что они принимают участие в процессе распознавания вирусных, бактериальных, микоплазменных и паразитарных инфекций, а также при метастазировании рака, росте и дифференцировке клеток [2–4]. Однако значительное число данных исследований связано с использованием лектинов растений [5]. В настоящее время установлено, что многие функции, выполняемые лектинами растений, характерны и для лектинов микроорганизмов. В этом отношении хорошо изучены бациллы, псевдомонады, азоспирилы [6–8]. Исследований, связанных с лектинами микромицетов, значительно меньше.

Лектины микромицетов были описаны как химиотерапевтические агенты, митогены и средства доставки лекарств к необходимым мишеням [9]. Для некоторых из них установлена антибактериальная, инсектицидная, противовирусная активность [10–12].

Действие лектинов микромицетов на растительные объекты отражено в небольшом количестве опубликованных работ, в основном связанных с защитой растений от насекомых. Инсектицидные свойства лектинов грибов установлены у ряда грибов-базидиомицетов, дикариотических грибов, у маннозо-специфичного лектина из *Penicillium chrysogenum* и лектина *Phytophthora parasitica* [13–15].

Ростостимулирующее действие поверхностных лектинов *Fusarium solani* установлено на всхожесть и рост гороха [16]. Для лектинов других микромицетов данные работы не проводились.

Среди наиболее распространенных в природе микромицетов активно изучаются в настоящее время грибы рода *Alternaria*. Данный род включает как сапрофитные, так и фитопатогенные грибы. Установлено, что многие из них способны к образованию различных биологически активных соединений [17]. Однако способность данных микроорганизмов к синтезу лектинов была установлена только в последнее время [18]. Поскольку данные микромицеты, как и микромицеты рода *Fusarium*, способны к синтезу лектинов, было решено исследовать их действие на растительные объекты.

Цель исследования – изучение действия различных концентраций лектина микромицета рода *Alternaria* на энергию прорастания, всхожесть и ростовые процессы зерновых культур.

Материалы и методы исследования

В работе использовали штамм микромицета *Alternaria alternata* 4 музея кафедры биотехнологии Первого государственного медицинского университета им. И. М. Сеченова.

Культивирование микромицета осуществляли на картофельном отваре с добавлением глюкозы, жидкофазным методом, при периодическом культивировании в ста-

ционных условиях роста. Температура культивирования 28 °С.

Для получения лектинов использовали экстракты 6-суточного мицелия гриба *Alternaria alternata* 4. Мицелий собирали фильтрованием с помощью промышленной ткани, маркировки (полиэтилентерефталат) для лабораторного биопроцессинга фирмы «АкваАналитикс Техника». После чего собранный мицелий тщательно промывали стерильной дистиллированной водой, а затем 20 мМ Tris-HCl буфером (рН 7,2), с последующей гомогенизацией в данном буфере при соотношении 1:1. Гомогенизацию производили на размольной garniture ESSA марки В800 компании «АМТЕХ». Полученный гомогенат оставляли при перемешивании в течение 5–6 ч при температуре 4 °С. Затем осадок отделяли центрифугированием в течение 10 мин при 5000 g, 4°С. Полученный супернатант анализировали на присутствие белка и лектинов.

Белок определяли по методу Бредфорда [19, с. 183], активность лектинов – реакцией агглютинации с нативными эритроцитами человека I группы крови. В работе использовали 2 %-ную суспензию эритроцитов, полученную по методу Луцика с соавт. [20, с. 13].

В работе с растениями использовали лектин микромицета *Alternaria alternata* 4, в виде суммарного белка, осажденного сульфатом аммония 65 % из клеточного экстракта мицелия гриба и содержащего лектин в концентрации 67–70 %.

Действие лектинов *Alternaria alternata* 4 в различных концентрациях изучали на зерне озимой пшеницы «Казанская 560». Перед посевом семена растений предварительно стерилизовали 2 %-ным перманганатом калия в течение 15 мин, после чего многократно промывали дистиллированной водой.

В экспериментах определяли энергию прорастания и всхожесть семян. Для определения ростовых показателей использовали морфометрические данные: длину корней и побегов, число корней и их сырую биомассу. Все эксперименты проводились в трех повторностях, с учетом необходимого количества исследуемых семян.

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили путем определения средних арифметических значений и их стандартных ошибок, используя стандартный пакет программ Microsoft Office Excel 2013. Достоверность разницы между сравнимыми величинами оценивали по критерию Стьюдента. Статистически значимыми считали различия при 95 % доверительной вероятности ($p \leq 0,05$).

Результаты исследования и их обсуждение

Для оценки влияния мицелиальных лектинов микромицета *Alternaria alternata* 4 на энергию прорастания и всхожесть семян пшеницы проводили их обработку в течение 24 ч, с последующим распределением на поверхности, увлажненной стерильной водой, фильтровальной бумаги, в чашках Петри. В работе использовали лектин в концентрации 5, 10, 20, 40, 80 и 400 мкг/мл. Выбор концентраций был основан на ранее проведенных исследованиях по лектинам грибов и бактерий [21, с. 106; 22]. Контролем, служили образцы семян, которые замачивались в 20 мМ трис-HCl буфере (рН 7,2). Определение энергии прорастания устанавливали на 3-е сутки после обработки семян лектином, всхожесть регистрировали через 7 дней, что соответствует принятым временным значениям для данного вида семян (табл. 1).

Таблица 1

Влияние лектина *Alternaria alternata* 4 на энергию прорастания, всхожесть семян пшеницы

Варианты опыта	Концентрация лектина, мкг/мл	Энергия прорастания, %	Всхожесть, %
Контроль	0	68,5	74,0
Лектин <i>Alternaria alternata</i> 4	5	69,4	76,3
	10	82,3	86,6
	20	81,9	87,9
	40	69,7	84,9
	80	68,2	73,8
	400	0	0

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

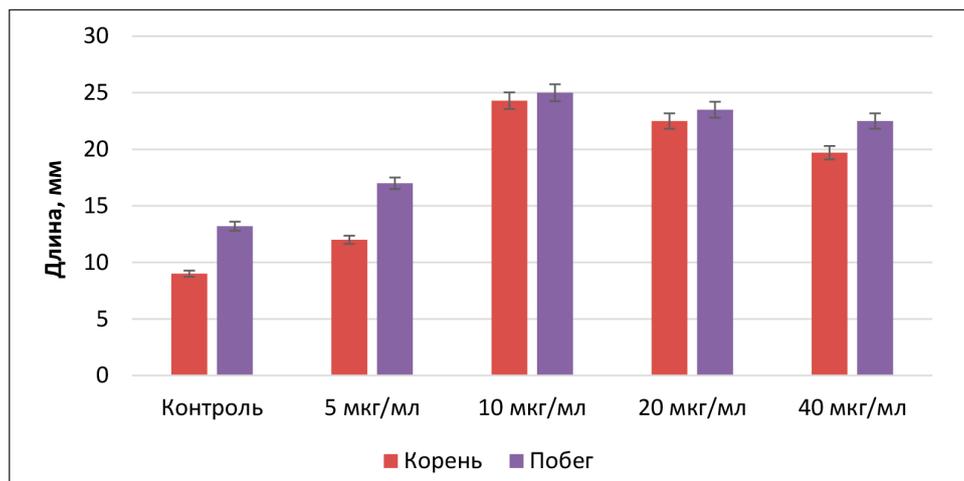


Рис. 1. Длина корней и побега на 10-й день выращивания пророщенных семян пшеницы, обработанных лектином *Alternaria alternata* 4

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Проведенные исследования показали положительное влияние лектина *Alternaria alternata* 4 на энергию прорастания и всхожесть семян зерновых культур, в концентрациях 5–40 мкг/мл. Лучшие результаты были получены при обработке семян пшеницы лектином в концентрации 10 и 20 мкг/мл, когда энергия прорастания и всхожесть семян увеличивалась на 7–14 % относительно контроля. Более низкие и более высокие концентрации лектина (5 и 40 мкг/мл) увеличивали энергию прорастания и всхожесть семян, но в меньшей степени. Повышение концентрации лектина в растворе до 80 мкг/мл не вызывало увеличения стимулирующего действия на семена, а концентрации 400 мкг/мл тормозили всхожесть. Однако ингибирующее действие лектина было обратимым: семена, промытые и помещенные в водный раствор, полностью восстанавливали свою всхожесть. Такое действие лектинов азоспирилл на семена пшеницы отмечалось в работах Никитиной с соавт. [23]. Данные результаты показали, что концентрация лектина играет важную роль при воздействии лектина на растения и имеет дозозависимый эффект.

Для оценки влияния лектина микроицета *Alternaria alternata* 4 на рост и развитие растений мы обрабатывали 3-суточные проросшие семена пшеницы лектином в концентрации 5, 10, 20, 40 мкг/л. Обработку вели в течение 24 ч. Контролем служили образцы проросших семян, которые замачивались в 20 мМ трис-НСl буфере (рН 7,2).

Результаты исследований показали, что обработка семян лектином *Alternaria alternata* 4 оказывала положительное действие и на морфометрические показатели растений (рис. 1). Обработка семян пшеницы лектином *Alternaria alternata* 4 в концентрации 5 мкг/мл усиливала рост корней и зародышевого побега растения в 1,3 раза по сравнению с контролем. По мере увеличения концентрации лектина до 10 мкг/мл положительный эффект был более выраженным: увеличилось количество корней и их длина (в 2,7 раза), зародышевые побеги были длиннее и утолщеннее (в 1,9 раза) по сравнению с контролем. При обработке семян растений лектином в концентрации 20 мкг/мл общая картина увеличения корней и побега сохранялась (корни увеличивались в 2,5 раза, побеги – в 1,8 раза). При обработке семян растений лектином в концентрации 40 мкг/мл длина корней и побегов увеличивалась, но сохранялась на уровне, соответствующем обработке при 20 мкг/мл (рис. 2).

Полученные данные по увеличению длины корней и побегов пшеницы после обработки семян лектином *Alternaria alternata* 4 подтверждаются данными по определению их биомассы (табл. 2).

Определение биомассы корней пшеницы показало, что наибольшее количество биомассы образуется при обработке проросших семян лектином *Alternaria alternata* 4 в концентрации 10 и 20 мкг/мл, в данных вариантах опыта количество биомассы корней пшеницы возрастало в 2,3–2,5 раза, а биомасса побегов – в 3,3–4,0 раза.



Рис. 2. Обработка проросших семян пшеницы лектином *Alternaria alternata 4*: 1 – контроль (без обработки лектином), 2 – обработка лектином в концентрации 10 мкг/мл
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 2

Биомасса корней и побегов пшеницы на 10-й день выращивания растений после обработки лектином *Alternaria alternata 4*

№	Концентрация лектина, мкг/мл	Биомасса корней, г/15 растений	Биомасса побегов, г/15 растений
1	Контроль	0,70±0,02	0,30±0,02
2	5	1,21±0,02	0,60±0,04
3	10	1,72±0,04	1,22±0,02
4	20	1,63±0,04	0,98±0,04
5	40	1,62±0,04	0,87±0,04

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Выводы

Полученные результаты показали, что лектины *Alternaria alternata 4* в концентрации 10 и 20 мкг/мл стимулируют энергию прорастания (на 13–14 %), всхожесть семян зерновых культур (на 13–14 %), а также обладают ростостимулирующим действием на развитие корней (в 2,5–2,7 раза) и побегов зерновых культур (в 1,8–1,9 раза). Несмотря на то, что эффективное действие препарата на семена и растения приходится на концентрации 10 и 20 мкг/мл, лучшие показатели в исследованиях соответствуют концентрации лектина 10 мкг/мл, которую можно рекомендовать для использования.

Заключение

Согласно проведенным исследованиям, лектин микромицета *Alternaria alternata 4* можно отнести к разряду биологически активного препарата. В исследованиях было показано, что лектин микромицета рода *Alternaria*, особенно в концентрации 10 мкг/мл

стимулировал все показатели, характерные для всхожести семян, роста и развития растений. Благоприятное действие лектинов на развитие растений способствовало увеличению длины корней и побегов пшеницы, а также к накоплению растительной биомассы, что напрямую связано с повышением урожайности культур. Действие лектинов *Alternaria alternata* имеет дозозависимый эффект, но высокие концентрации не приводят к гибели растений, что говорит о возможности использования исследуемых лектинов в растениеводстве.

Список литературы

- ГОСТ 33980-2016. Продукция органического производства. Правила производства, переработки, маркировки и реализации. М.: Издательство стандартов. 2018. 59 с.
- Coelho B. B., don Santos Silva P. V., de Oliveira V. F. et.al. Lectins antimicrobial agent // J. Applied Microbiol. 2018. Vol. 125. Is. 5. P. 1238–1252. DOI: 10.1111/jam.14055.
- Carneiro D. C. et al. A patent review of the antimicrobial applications of lectins: Perspectives on therapy of infectious diseases // J. Appl. Microbiol. 2022. Vol. 132. Is. 2. P. 841–854. DOI: 10.1111/jam.15263.

4. El-Maradny Y. A., El-Fakharany E. M., Abu-Serie M. M., Hashish M. H., Selim H. S. Lectins purified from medicinal and edible mushrooms: Insights into their antiviral activity against pathogenic viruses // *J. Biol. Macromol.* 2021. Vol. 179. P. 239–258. DOI: 10.1016/j.jbiomac.2021.03.015.
5. El-Araby M. M., El-Shatoury E. H., Soliman M. M. et al. Characterization and antimicrobial activity of lectins purified from three Egyptian leguminous seeds // *AMB Expr.* 2020. Vol. 10. P. 90–95. DOI: 10.1186/s13568-020-01024-4.
6. Кобелев А. В., Клементьев С. В., Вдовина Т. В., Сироткин А. С. Оценка активности внеклеточных лектинов бактерий в формировании агрегированных микробных форм // *Бутлеровские сообщения.* 2021. Т. 1. № 65. С. 105–113. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/21-65-1-105. EDN: NKEUVI.
7. Кикалова Т. П., Сметанина М. Д., Карпунина Л. В. Биологическая активность лектина бацилл в составе экзополисахаридных гелей // *Фундаментальные исследования.* 2009. № 7. С. 14–17. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=2099> (дата обращения: 29.01.2026).
8. Никитина В. Е., Богомоллова Н. В., Пономарева Е. Г., Соколов О.И. Влияние лектинов азоспирилл на способность семян к прорастанию // *Известия Российской академии наук. Серия биологическая.* 2004. № 4. С. 431–435. EDN: OTUGXR.
9. Savanur M. A., Eligar S. M., Pujari R. et. al. *Sclerotium rolfsii* lectin induces stronger inhibition of proliferation in human breast cancer cells than normal human mammary epithelial cells by induction of cell apoptosis // *PLoS One.* 2014. Vol. 9. Is. 11. P. 110–107. DOI: 10.1371/journal.pone.0111017.
10. Мухаммадиев Рин. С., Мухаммадиев Риш. С., Багаева Т. В. Углеводная специфичность поверхностных лектинов грибов *Fusarium solani* // *Вестник биотехнологии.* 2017. Т. 12. № 3. С. 26–30. URL: https://biorosinfo.ru/upload/file/vestnik/2017/Annotation_V%202013_2017_3.pdf (дата обращения: 21.02.2026). EDN: TAJNHL.
11. Singh R. S., Amandeep K. W., Kennedy J. F. Structural aspects and biomedical applications of microfungus lectins // *International Journal of Biological Macromolecules.* 2019. Vol. 134. P. 1097–1107. DOI: 10.1016/j.jbiomac.2019.05.093.
12. De Oliveira D. S. D., Cardoso G., Neis A. et. al. Antifungal effect of *Bauhinia variegata* lectin (BvL) on *Bipolaris oryzae* // *Curr. Microbiol.* 2024. Vol. 81. Is. 10. P. 329–334. DOI: 10.1007/s00284-024-03848-w.
13. Pohleven J., Brzin J., Vrabec L. et. al. Basidiomycete *clitocybe nebularis* is rich in lectins with insecticidal activities // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2011. Vol. 91. Is. 4. P. 114–118. DOI: 10.1007/s00253-011-3236-0.
14. Žurga S., Pohleven J., Renko M. et. al. A novel β -trefoil lectin from the parasol mushroom (*Macrolepiota procera*) is nematotoxic // *FEBS J.* 2014. Vol. 281. Is. 15. P. 489–506. DOI: 10.1111/febs.12875.
15. Francis F., Jaber K., Colinet F. et. al. Purification of a new fungal mannose-specific lectin from *Penicillium chrysogenum* and its aphicidal properties // *Fungal. Biol.-UK.* 2011. Vol. 115. Is. 11. P. 1093–1099. DOI: 10.1016/j.funbio.2011.06.010.
16. Мухаммадиев Р. С., Мухаммадиев Р. С., Скворцов Е. В., Валиуллин Л. Р., Глинушкин А. П., Багаева Т. В. Выделение, очистка и характеристика лектина *Fusarium solani* 4 // *Прикладная биохимия и микробиология.* 2021. Т. 57. № 2. С. 145–151. DOI: 10.31857/S0555109921020094. EDN: BDVBAD.
17. Далинова А. А., Салимова Д. Р., Берестецкий А. О. Грибы рода *Alternaria* как продуценты биологически активных соединений и биогербицидов // *Прикладная биохимия и микробиология.* 2020. Т. 56. № 3. С. 223–241. DOI: 10.31857/S0555109920030022.
18. Зинуров М. Р., Багаева Т. В., Зинурова Е. Е., Сысова М. А. Кинетика роста и образования лектинов грибами рода *Alternaria* в зависимости от времени культивирования и компонентов питательной среды // *Технология живых систем.* 2025. Т. 22. № 3. С. 99–108. DOI: 10.18127/j20700997-202503-10. EDN: IYVNCW.
19. Биссвангер Х. *Практическая энзимология* / Пер. с англ. Т. П. Мосолова. Под ред. Т. И. Почкаева. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2010. 328 с. ISBN 978-5-94774-940-3.
20. Луцки М. Д., Панасюк Е. Н., Луцки А. Д. *Лектины* / Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те, 1981. 156 с.
21. Мухаммадиев Р. С. Сравнительная характеристика лектинов сапрофитных и фитопатогенных штаммов грибов *Fusarium solani*: дис. ... канд. биол. наук. Казань, 2018. 148 с. [Электронный ресурс] URL: <https://www.dissercat.com/content/sravnitel'naya-kharakteristika-lectinov-saprofitnykh-i-fitopatogennykh-shtammov-gribov-fusari> (дата обращения: 20.02.2026).
22. Аленькина С. А., Никитина В. Е. Стимулирующий эффект лектинов ассоциированных бактерий рода *Azospirillum* на всхожесть и морфологические характеристики проростков яровой пшеницы при смоделированных абиотических стрессах // *Физиология растений.* 2021. Т. 68. № 2. С. 170–176. DOI: 10.31857/S0015330321010024. EDN: FOJYVH.
23. Аленькина С. А., Купряшина М. А. Дозозависимые эффекты лектина азоспирилл на рост проростков пшеницы в условиях солевого стресса // *Прикладная биохимия и микробиология.* 2024. Т. 60. № 1. С. 59–85. DOI: 10.31857/S0555109924010067. EDN: HCNLNC.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

СТАТЬИ

УДК 502:550.8
DOI 10.17513/use.38475



CC BY 4.0

**ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ
СЕЛИТЕБНОГО ОСВОЕНИЯ ГЕОСИСТЕМ МОРДОВИИ**

Вавилин Н. А.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева», Саранск, Российская Федерация, e-mail: nikvav925@gmail.com

Целью статьи является анализ закономерности селитебного освоения геосистем Республики Мордовия для принятия управленческих решений по оптимизации функционирования эколого-социально-экономических систем. В основе исследования лежат данные о геосистемах Республики Мордовия, изменении сети населенных пунктов. В качестве основных методов исследования авторами использовались геоинформационный, сравнительно-географический и статистический методы. Результаты исследования показали, что до середины XX в. происходило активное развитие системы расселения во всех типах геосистем, стимулированное аграрной политикой, индустриализацией и развитием транспортной инфраструктуры. Со второй половины XX в. наблюдается обратная тенденция – запустение малых населенных пунктов. Демографические потери, государственная политика по ликвидации «неперспективных» деревень и урбанизация привели к массовой миграции в города и, как следствие, к исчезновению малых сельских поселений. Комплексный анализ взаимодействия природных, социальных и производственных систем позволил определить современный опорный хозяйственный каркас территории, создать оценочно-прогностическую модель, отражающую тенденции депопуляции сельских поселений с численностью населения менее 30 чел. Полученные результаты имеют большое практическое значение для специалистов, связанных с землеустройством, ландшафтным планированием и природопользованием, и для принятия управленческих решений по оптимизации развития эколого-социально-экономических систем региона.

Ключевые слова: геоинформационное моделирование, геосистемы, геоэкологический анализ, селитебное освоение, сеть населенных пунктов

**GEOINFORMATION ANALYSIS OF RESIDENTIAL DEVELOPMENT
OF THE GEOSYSTEMS OF MORDOVIA**

Vavilin N. A.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“National Research Mordovian State University named after N. P. Ogarev”,
Saransk, Russian Federation, e-mail: nikvav925@gmail.com*

The purpose of the article is to analyze the patterns of residential development of geosystems of the Republic of Mordovia for making managerial decisions on optimizing the functioning of ecological, socio-economic systems. The research is based on data on the geosystems of the Republic of Mordovia and changes in the network of settlements. The authors used geoinformation, comparative geographical and statistical research methods as the main research methods. The results of the study showed that until the middle of the 20th century, the active development of the settlement system of all types of geosystems was characterized, stimulated by agrarian policy, industrialization and the development of transport infrastructure. Since the second half of the 20th century, the opposite trend has been observed – the desolation of small settlements. Demographic losses, government policies to eliminate “unpromising” villages, and urbanization have led to mass migration to cities and, as a result, the abandonment of small rural settlements. A comprehensive analysis of the interaction of natural, social and industrial systems allowed us to determine the modern basic economic framework of the territory, to create an estimated and predictive model reflecting the trends of depopulation of rural settlements with a population of less than 30 people. The results obtained are of great practical importance for specialists involved in land management, landscape planning and environmental management, and for making managerial decisions to optimize the development of the ecological, socio-economic systems of the region.

Keywords: geoinformation modeling, geosystems, geoecological analysis, residential development, network of settlements

Введение

Актуальность исследования процессов селитебного освоения геосистем играет ключевую роль в понимании пространственно-временной динамики отношений между природой и обществом на определенной территории. Сеть населенных пунктов, будучи основой территориальной

организации общества, является индикатором социально-экономических процессов, происходящих в стране и ее регионах. Она постоянно трансформируется под влиянием экономических, социальных, геоэкологических, административных и иных факторов. Изучение динамики численности и пространственной структуры населенных пун-

тков представляет собой важную задачу, позволяющую выявить глубинные закономерности регионального развития и прогнозировать его эволюцию, что позволит целенаправленно распределить ресурсы для обеспечения устойчивого развития территории.

Цель исследования – выделить закономерности селитебного освоения геосистем Республики Мордовия для принятия управленческих решений по оптимизации функционирования эколого-социально-экономических систем.

Материалы и методы исследования

Геоэкологический анализ селитебного освоения геосистем Мордовии основывается на цифровых интерактивных картах и энциклопедических блоках региональных геопорталов «Природное и культурное наследие Республики Мордовия. Путешествуем с Русским географическим обществом» (<https://map.rgo.life/>) и «Метагеосистемы Мордовии. Пространственные данные региона» (<https://meta.rgo.life/>). Ключевым элементом в проведенном исследовании служит синтетическая электронная карта геосистем географической информационной системы (ГИС) «Мордовия». При формировании баз данных использовались материалы сборников «Основные итоги всероссийской переписи населения Респу-

блики Мордовия». Сопряженный геоэкологический анализ природных, социальных и производственных систем проведен на иерархическом уровне – типы геосистем, в основу выделения которых положены почвенно-биологические признаки. Ключевыми методами исследования стали геоинформационный, сравнительно-географический, статистический.

Результаты исследования и их обсуждение

Республика Мордовия находится в центре Русской равнины, на северо-западных склонах Приволжской возвышенности, которая на западе республики переходит в Окско-Донскую низменность. Наиболее возвышенным является междуречье Алатыря и Суры, где абсолютные отметки достигают 334 м, снижаясь в поймах рек до 89–115 м. Приволжская возвышенность отличается доминированием геосистем северной лесостепи на эрозионно-денудационных и вторичных моренных равнинах. На Окско-Донской низменности преобладают лесные типы геосистем на водно-ледниковых равнинах с широкими речными долинами. Абсолютные отметки варьируют от 170 до 215 м, а в долинах они снижаются до 90 м [1, с. 6]. Для региона характерно отчетливое проявление склоновой смены геосистем (рис. 1).

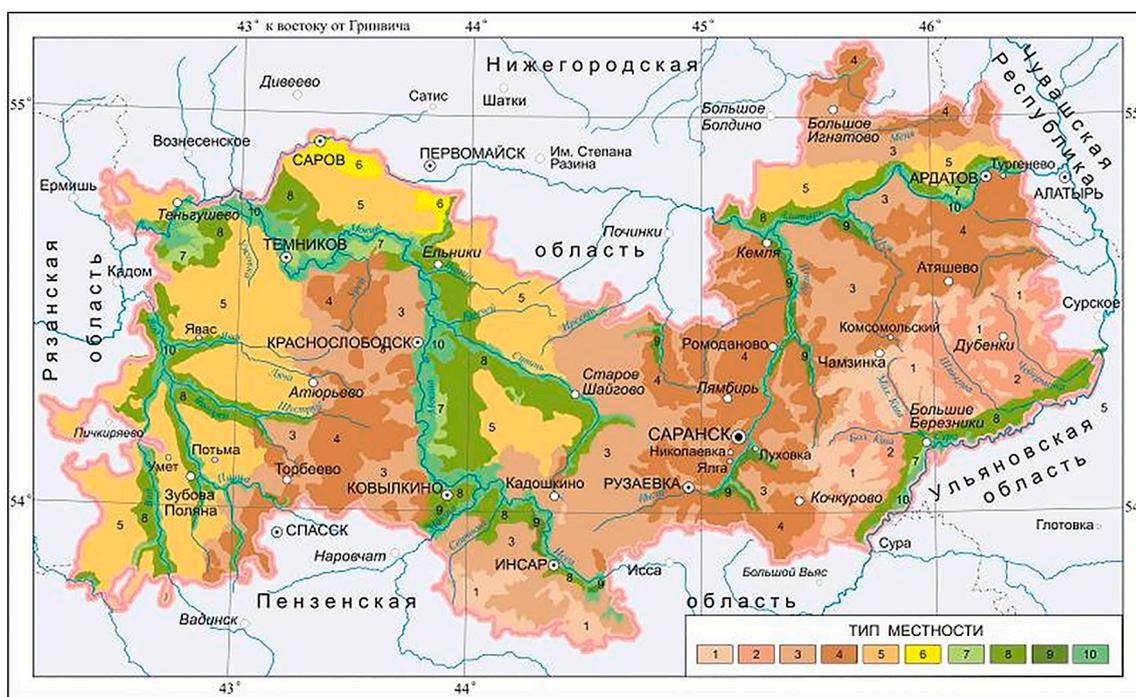


Рис. 1. Типы геосистем (легенда в тексте)

Примечание: составлен автором на основе источника [2]

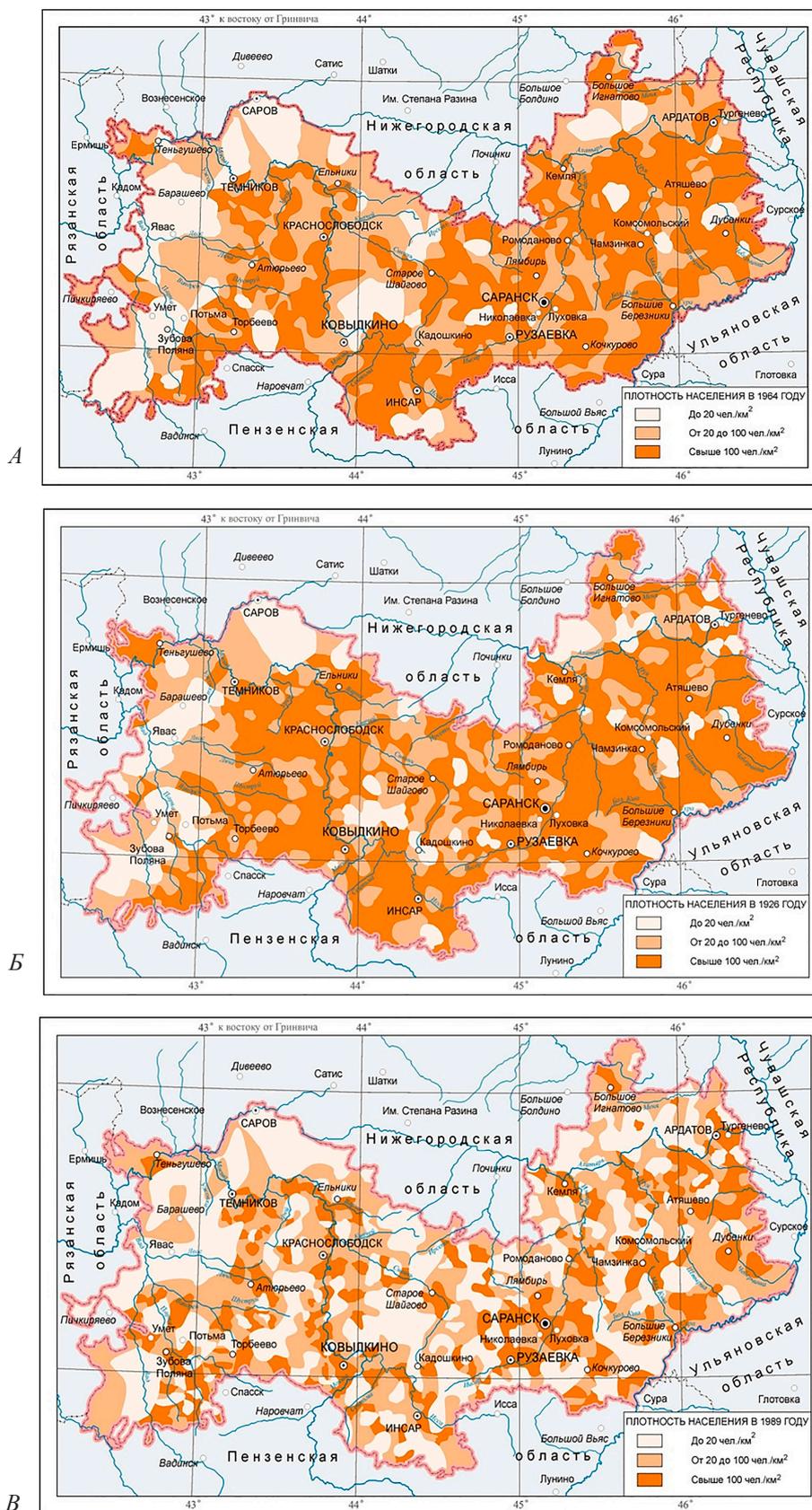


Рис. 2. Плотность населения в Республике Мордовия: А – в 1864 г., Б – в 1926 г., В – в 1989 г.
Примечание: составлен автором на основе источника [2]

– *Эрозионно-денудационная равнина*: 1 – широколиственные леса со светло-серыми и серыми лесными щелочистыми почвами с выходами на поверхность опок и мергелей; 2 – широколиственные леса и кустарниковые степи с темно-серыми лесными почвами, карбонатными и оподзоленными черноземами с выходами на крутых склонах писчего мела.

– *Вторичная моренная равнина*: 3 – широколиственные леса с серыми лесными суглинистыми почвами; 4 – луговые и кустарниковые степи с выщелоченными, оподзоленными и луговыми черноземами.

– *Водно-ледниковые равнины*: 5 – хвойные и смешанные леса с дерново-подзолистыми и серыми лесными почвами и торфяными болотами; 6 – хвойные и смешанные леса с подзолистыми, дерново-подзолистыми почвами и торфяными болотами.

– *Долины крупных и средних рек*: 7 – хвойные и смешанные леса на террасах, с подзолистыми, дерново-подзолистыми и слабо развитыми песчаными почвами; 8 – широколиственные леса с серыми лесными почвами и оподзоленными черноземами; 9 – кустарниковые и луговые степи на выщелоченных, оподзоленных, луговых черноземах; 10 – поймы.

Лесостепные и лесные геосистемы Мордовии относятся к регионам древнего освоения. Это нашло свое отражение как в изменении численности населенных пунктов, так и в изменении плотности населения. На картах, показывающих динамику изменения плотности населения за 1864–1998 гг. (рис. 2, А, Б), наглядно прослеживаются два основных периода. Первый (аграрный) – до середины XX в., отличается активным освоением геосистем новых территорий региона. Второй (индустриальный) – со второй половины XX в., с миграцией населения в локальные и региональные центры (рис. 2, В).

В середине XX в. селитебное освоение геосистем региона находилось под влиянием индустриализации и коллективизации, демографических потрясений военных и послевоенных лет, стагнации советского периода и радикальных социально-экономических

трансформаций постсоветской России. Каждый из них наложил свой отпечаток на особенности селитебного освоения, которые отразились на сети населенных пунктов республики, вызывая такие явления, как стремительный рост городов, запустение малых деревень и изменение их иерархии [3; 4].

Статистические данные о численности населенных пунктов за период с 1931 по 2024 г. показывают их сокращение. Число поселений за изучаемый период сократилось с 1901 до 1237 (табл. 1).

Исчезновение 34,9 % населенных пунктов связано как с влиянием совокупности экономических, социальных, административных и иных факторов, происходящих на территории Республики Мордовия, так и тем, что в данных переписи населения Мордовской АССР за 1931 г. число населенных пунктов преувеличено, так как помимо сел, деревень, поселков, железнодорожных станций и разъездов учитывались также лесные кордоны и сторожки, хутора, заимки, железнодорожные будки и казармы, мельницы и т.п. [5].

Так, в начале XX в. под влиянием аграрной политики, направленной на создание крепких фермерских хозяйств, которые должны были стать надежной опорой власти в деревне, крестьяне активно переселялись в ранее необжитые районы [6; 7, с. 54]. Изучение литературных источников показало, что в это время геосистемы осваивались не только силами жителей региона, но и поселенцев, которые прибыли в Мордовию из иных регионов и основывали населенные пункты в целях ведения коллективного сельского хозяйства. В это время также поселения возникали в местах строительства и вдоль железнодорожной ветки Потьма – Барашево. В первом случае названия населенных пунктов отличались символическим характером: Красная Заря, Марс, Искра и т. п. Во втором – название давалось в честь образовавшего их объекта: Торфоразработки, Пенькозавод, Крахмалопаточный завод и т. п. В третьем – поселения выросли из исправительных трудовых учреждений [5].

Таблица 1

Изменение числа населенных пунктов Мордовии

Поселения	1931	1941	1955	1967	1977	1986	1998	2014	2024
Сельские	1901	1732	1700	1640	1508	1420	1326	1240	1237
Города	4	5	5	7	7	7	7	7	7
Поселки	3	4	3	12	17	19	19	13	13

Примечание: составлена автором по результатам данного исследования.

Таблица 2

Распределение населенных пунктов по геосистемам

Геосистемы	Плотность населенных пунктов ед./км ² , %			
	1931 г.	1960 г.	1990 г.	2024 г.
Остепненные нагорные дубравы с серыми лесными щебнистыми почвами	1,2	2,6	2,2	2,2
Широколиственные леса с серыми лесными почвами	14,7	20,5	18,5	18,3
Лесостепь с доминированием оподзоленных черноземов	15,2	19,7	17,7	17,3
Луговые степи с выщелоченными и луговыми черноземами	27,4	34,6	31	30,6
Хвойные и смешанные леса с дерново-подзолистыми почвами	0,099	0,146	0,142	0,139

Примечание: составлена автором по результатам данного исследования.

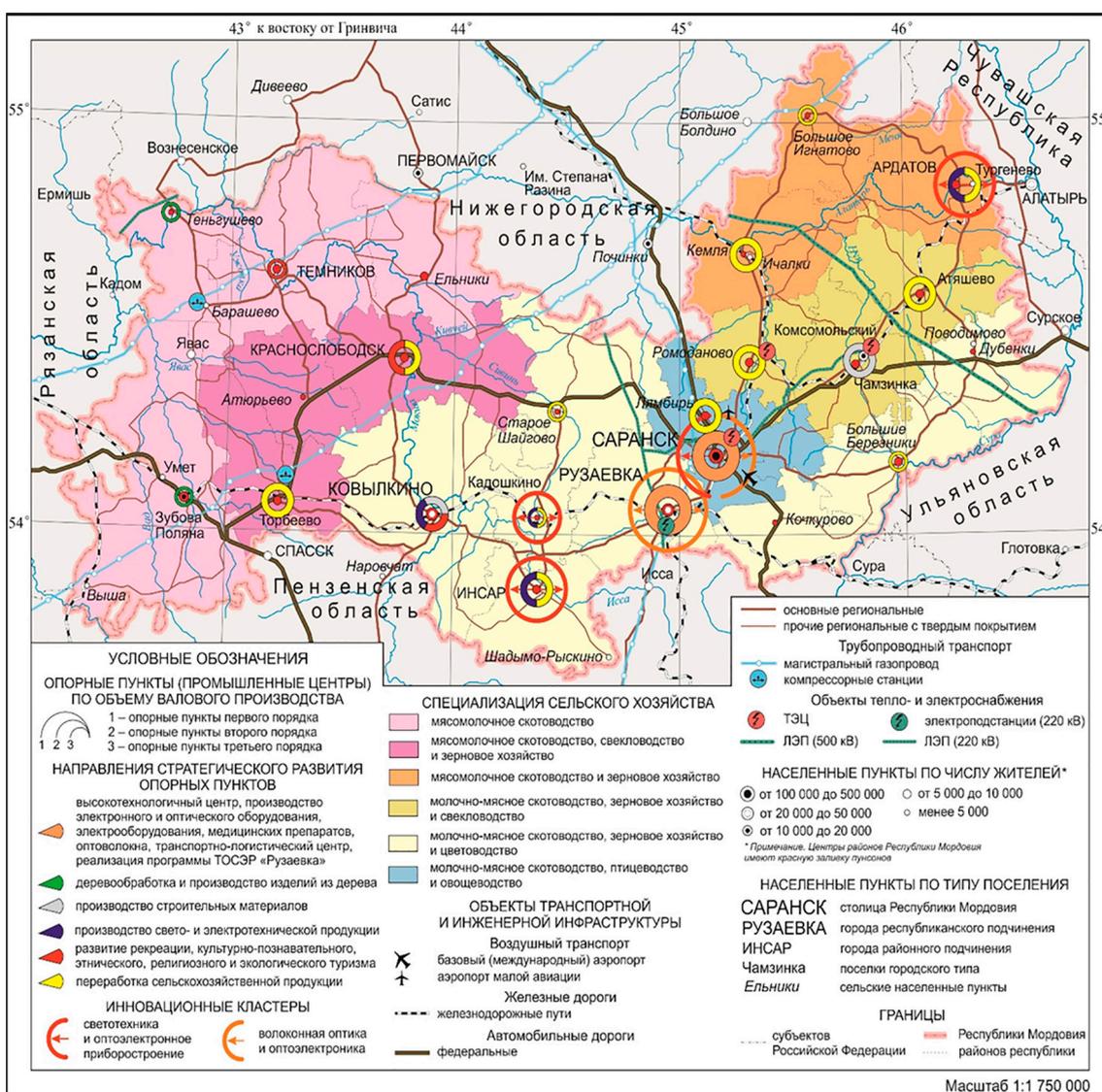


Рис. 3. Опорный хозяйственный каркас Республики Мордовия и стратегические оси развития территории
Примечание: составлен автором на основе источника [2]

В этот период наиболее активно вовлекались в использование геосистем широколиственных и смешанных лесов (табл. 2) менее лесостепные геосистемы, которые уже к периоду Генерального межевания земель (конец XVIII в.) характеризуются значительной сельскохозяйственной освоенностью [8].

Наибольшее изменение претерпели геосистемы остепненных нагорных дубрав с серыми лесными щебнистыми почвами. Они характеризуются низким плодородием почв и слабой их устойчивостью к развитию плоскостной и линейной эрозии, что не могло не сказаться негативно как на геоэкологическом состоянии геосистем, так и на социально-экономическом состоянии проживающего вблизи населения. Активное ведение сельскохозяйственной деятельности привело к развитию деструктивных геоэкологических процессов: разрушению почвенного покрова и развитию эрозии [9, с. 75].

Как видно из табл. 2, до 1960-х гг. велось активное селитебное освоение во всех геосистемах.

Процессы депопуляции населенных пунктов во второй половине XX в. связаны с рядом событий: Великая Отечественная

война, в результате которой погибло более 120 тыс. чел. из Мордовии [10, с. 74]; правительственная программа ликвидации «неперспективных деревень» 1960–1970-х гг., в рамках которой ликвидировалась часть малых поселений в целях создания крупных населенных пунктов с относительно высоким уровнем жизни [11]. Исследования, проведенные в работах Е. В. Моисеева [12, с. 35] и А. П. Евдокимова [13, с. 22], показали, что в это время на территории Мордовии происходит активное промышленное развитие районных центров, что поспособствовало миграции молодых людей от 19 до 29 лет (они составляли 80 % сельских мигрантов) из сельских поселений в города и поселки городского типа. Активно забрасывались под влиянием перечисленных выше процессов населенные пункты, возникшие преимущественно в конце XIX – первой половине XX в. Характерной чертой стало усиление процессов концентрации населения у центров культуры, экономики и хозяйства и вдоль крупных логистических маршрутов, формирующих опорный хозяйственный каркас территории.

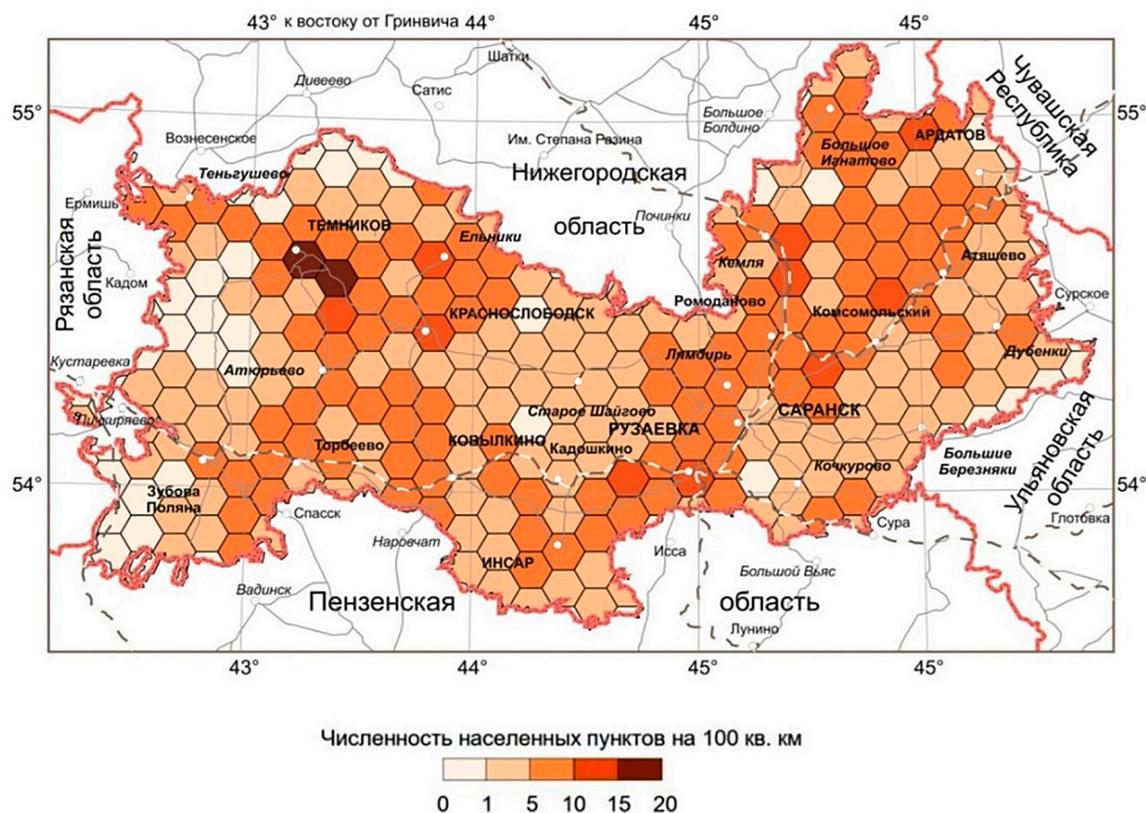


Рис. 4. Плотность населенных пунктов в 2024 г.

Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

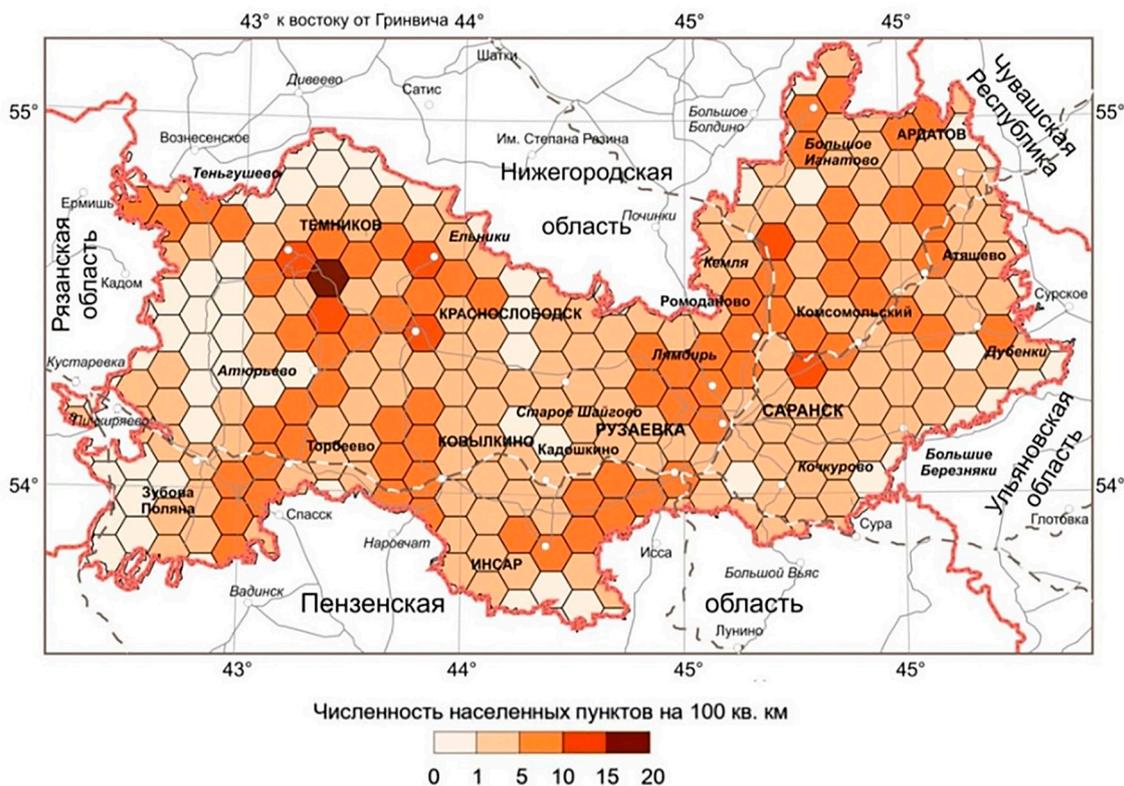


Рис. 5. Прогноз изменения плотности населенных пунктов на 2030 г.
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

В настоящее время Республика Мордовия относится к густонаселенным регионам Российской Федерации. Средняя плотность населения на 2024 г. – 29,05 чел./км² [2]. По плотности населения она занимает третье место в Волго-Вятском районе, уступая Чувашской Республике и Нижегородской области.

Совокупность описанных выше процессов сформировала структуру современного опорного хозяйственного каркаса Республики Мордовия, представляющую собой совокупность наиболее устойчивых к воздействию внешних и внутренних факторов населенных пунктов [14]. Среди ключевых центров региона в качестве пунктов первого порядка выделяются Саранск и Рузаевка, формирующие Саранскую городскую агломерацию, с развитием промышленных, транспортных, культурных, научных и образовательных направлений; пункты второго порядка составляют города и поселения, функционирующие как центры административных районов, характеризующиеся экономической привлекательностью, развитым хозяйством и инфраструктурой; пункты третьего порядка – прочие районные центры республики [15; 16] (рис. 3).

Выделенные опорные пункты и ближайшие к ним поселения – места концентрации населения, прибывающего из окружающих сельских территорий, особенно из угасающих сельских поселений с численностью населения менее 30 чел., позволили создать (рис. 4, 5). Особенности селитебного освоения геосистем определяют усиление поляризации культурного пространства Мордовии, структурного изменения зон хозяйственного и экологического каркаса.

Заключение

Результаты геоинформационного моделирования селитебного освоения геосистем Мордовии свидетельствуют о высокой динамичности современного хозяйственного каркаса территории, состоящего из иерархически организованных центров и стратегических осей развития. Текущая концентрация населения в этих узлах и вдоль логистических маршрутов сопровождается трансформацией культурных пространств в периферийных сельских местностях.

Разработанная оценочно-прогнозная модель позволила выявить тренды депопуляции малых населенных пунктов. Однако следует заметить, что модель лишь экстра-

полирует полученные в ходе исследования тренды и не учитывает процессы возврата населения в поселения.

Перспективы дальнейших исследований по данной тематике заключаются в проектировании и развитии региональных геопорталов, отражающих взаимодействие природных, социальных и производственных систем в процессе хозяйственного освоения геосистем для принятия, и поддержке управленческих решений по оптимизации природопользования.

Список литературы

1. Бучацкая Н. В., Володина Т. В., Гагарин Ю. Н., Гуляев В. А., Гуськова Н. Д., Киревичев В. К., Киришин А. В., Коваленко Е. Г., Кормишкина Л. А., Куликов Н. Д., Макаров Е. Т., Маскаева Н. Ю., Махаев В. Б., Моисеенко В. А., Нежданов В. А., Неретина Е. А., Никифорова И. А., Порунов С. К., Сайгина А. В., Сафонова В. Н., Сафонова Н. Е., Свиридов А. А., Стульцев Ю. К., Тамошина О. А., Федотов Ю. Д., Федотова В. Ф., Филиппова Н. А., Шутов А. М., Ямашкин А. А. Геоэкология населенных пунктов Республики Мордовия / Ред. группа: А. А. Ямашкин (науч. ред. и сост.), В. А. Гуляев, Н. Д. Гуськова, И. Е. Дыков, А. А. Свиридов. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2001. 240 с. [Электронный ресурс]. URL: https://geo13.ru/media/data/geojekologija_naselennyh_punktov_respubliki_mordoviya.pdf (дата обращения: 25.12.2025). ISBN 5-7103-0629-0.
2. Ямашкин А. А., Вдовин С. М., Юрченков В. А., Антоноук Г. С., Володина Т. В., Галахова Э. Н., Гришуткин Г. Ф., Ершов А. С., Кулашкина Н. Н., Кузнецов В. А., Лапшин А. С., Максимкин В. М., Меркулова С. В., Сафонова В. Н., Сергейчева С. В., Силаева Т. Б., Спиридонов С. Н., Тарасова А. Г., Федотова В. Ф., Хлевина С. Е., Щетинина А. С., Ямашкин С. А., Ивлиева Н. Г., Мокшин Н. Ф., Махаев В. Б., Бахмутов С. Б., Логинова Н. Н., Москалева С. А., Нехаева Н. Е., Окунев Д. В., Переточенкова О. У., Сарайкина С. В., Солдатова Е. П., Танасейчук А. Б., Фирстов М. И., Гуськова Н. Д., Кулашкин В. И., Куликов Н. Д., Максимкин В. М., Неретина Е. А., Носонов А. М., Нуякшина М. В., Пресняков В. Н., Володина Т. В., Коваленко А. К., Коршунова О. В., Акашкина А. Г., Бибикина А. В., Ломшин М. И., Масляев В. Н., Примаченко Е. И., Ручин А. Б. Географический атлас Республики Мордовия / Под ред. В. В. Ревин, В. В. Ружников, П. В. Сенин, Н. Е. Фомин, В. Т. Шумкин. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та. 2012. 204 с. ISBN 978-5-7103-2581-0.
3. Алексеев А. И., Сафронов С. Г., Савоскул М. С., Кузнецова Г. Ю. Основные тенденции эволюции сельского расселения России в XX – начале XXI вв. // ЭКО. 2019. № 4 (538). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnyetendentsii-evolyutsii-selskogo-rasseleniya-rossii-v-hh-nachale-hhi-vv> (дата обращения: 25.01.2026).
4. Гончарова М. Н., Гончарова Н. А., Хаитова А. И. Сбережения населения: сущность, факторы, динамика и роль в экономике России // Естественно-гуманитарные исследования. 2024. № 5 (55). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sberezheniya-naseleniya-suschnost-factory-dinamika-i-rol-v-ekonomike-rossii> (дата обращения: 25.12.2025).
5. Ивлиева Н. Г. Геоинформационно-картографическое обеспечение исследований пространственно-временных особенностей сельского расселения Республики Мордовия // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2017. № 2 (23). URL: <http://intercarto.msu.ru/jour/article.php?articleId=519&lang=ru> (дата обращения: 27.01.2026). DOI: 10.24057/2414-9179-2017-2-23-64-77.
6. Зоркова Н. Н. Столыпинская аграрная реформа в Мордовском крае // Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева. 2013. № 1–1 (77). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/stolypinskaya-agrarnaya-reforma-v-mordovskom-krae> (дата обращения: 20.12.2025).
7. Зоркова Н. Н. Столыпинская аграрная реформа в Мордовском крае: 1906–1914 гг. / Ред. группа: Г. А. Куршева (председатель), Е. Н. Бикейкин, С. В. Видяйкин, Е. В. Глазкова, Т. М. Гусева, О. В. Зарубина, И. В. Зубов, А. Н. Келина, И. В. Лаптева, Ю. А. Мишанин, Е. Г. Скворцова, П. С. Учватов, А. В. Чернов. Саранск: НИИ гуманитарных наук при Правительстве Республики Мордовия. 2023. 160 с. ISBN 978-5-00008-085-6.
8. Ямашкин А. А., Зарубин О. А., Ямашкин С. А. Историко-географический анализ селитебного освоения ландшафтов Мордовии // Центр и периферия. 2019. № 3. EDN BITTAS.
9. Демек Я. Теория систем и изучение ландшафта / Пер. с чеш. Т. В. Гальцевой и Т. Л. Тарасовой. Редакция К. Г. Тарасова, Предисл. акад. И. П. Герасимова. М.: Прогресс, 1977. 224 с.
10. Юрченков В. Л., Кочнев О. В., Ломшин В. Л., Надькин Т. Д., Филатов Л. Г. Мордовия в послевоенный период. 1945–1953 гг.: монография: в 2 т. / Редкол: А. А. Данилов, В. А. Юрченков (науч. редакторы), Е. Н. Бикейкин, Е. В. Глазкова, Т. М. Гусева, О. В. Зарубина, И. В. Зубов, В. А. Каланов, П. Н. Калигин, А. Н. Келина, Г. А. Куршева, В. А. Ломшин, Л. И. Никонова, Е. Г. Скворцова, А. Н. Чекушкин, А. В. Чернов. Саранск.: НИИ гуманитар. наук при Правительстве Республики Мордовия. 2015. Т. 2. 388 с. [Электронный ресурс]. URL: [https://niign.ru/izdatelskaya-deyatelnost/nauchnyie-izdaniya/seriya-mordoviya.-xx-vek/mordoviya-v-poslevoennyj-period.-1945-%E2%80%941953-\(tom-2\)](https://niign.ru/izdatelskaya-deyatelnost/nauchnyie-izdaniya/seriya-mordoviya.-xx-vek/mordoviya-v-poslevoennyj-period.-1945-%E2%80%941953-(tom-2)) (дата обращения: 20.12.2025).
11. Симинченко О. И. Решение проблемы «неперспективных деревень» в 1970-е годы // Скиф. 2023. № 11 (87). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/reshenie-problemy-neperspektivnyh-dereven-v-1970-e-gody> (дата обращения: 20.12.2025).
12. Моисеев Е. В. Мордовия во второй половине XX века: тенденции и противоречия социально-экономического развития (Исторический аспект): автореф. дис. ... докт. ист. наук. Саранск, 2004. 44 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dissercat.com/content/mordoviya-vo-vtoroi-polovine-xx-veka-tendentsii-i-protivorechiya-sotsialno-ekonomicheskogo-r> (дата обращения: 20.12.2025).
13. Евдокимов А. П. Трансформация социального поведения крестьянства Мордовии во второй половине 1920-х – 1930-е гг.: автореф. дис. ... канд. ист. наук. Саранск, 2021. 23 с. URL: <https://www.dissercat.com/content/transformat-siya-sotsialnogo-povedeniya-krestyanstva-mordovii-vo-vtoroi-polovine-1920-kh-1930> (дата обращения: 20.12.2025).
14. Попкова Л. И., Оломский А. А. Опорный каркас расселения Центрального Черноземья: особенности и характерные черты // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2024. № 3. С. 139–151. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opornyy-karkas-rasseleniya-tsentralnogo-chnozemya-osobennosti-i-harakternye-cherty> (дата обращения: 28.01.2026).
15. Евлампиева Е. В. Система опорных населенных пунктов как основа пространственного развития Российской Федерации // Вестник БГУ. Экономика и менеджмент. 2025. № 2. С. 66–73. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-opornyh-naselennyh-punktov-kak-osnova-prostranstvennogo-razvitiya-rossiyskoj-federatsii> (дата обращения: 21.12.2025).
16. Одинцова А. В. Опорные населенные пункты – новый приоритет пространственного развития Российской Федерации // Федерализм. 2025. Т. 30. № 1. С. 52–70. DOI: <https://doi.org/10.21686/2073-1051-2025-1-52-70>.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.



ОЦЕНКА АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ И ИХ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ В РЕГИОНАХ ЮЖНОЙ РОССИИ

Лазовский А. И. ORCID ID 0009-0009-3025-796X, Можяев Е. Е.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
дополнительного профессионального образования «Институт повышения
квалификации руководящих работников и специалистов», Балашиха,
Российская Федерация, e-mail: lazovskiy.tolik@mail.ru*

В условиях ускоряющихся климатических изменений особую актуальность приобретает анализ антропогенных факторов, определяющих региональные особенности изменения климата и связанные с ними геоэкологические последствия. Цель статьи заключается в выявлении и комплексной оценке антропогенных факторов климатических изменений и связанных с ними геоэкологических последствий в регионах Южной России на примере Северо-Кавказского и Южного федеральных округов. Исследование основано на анализе статистических данных Федеральной службы государственной статистики, материалов экологических рейтингов, данных мониторинга атмосферного воздуха и водных объектов, а также результатов современных научных публикаций; в работе применялись методы сравнительного, статистического и системного анализа с использованием геоэкологического и ландшафтного подходов. Установлено, что климатические изменения в рассматриваемых регионах формируются под воздействием совокупности промышленных, аграрных, транспортных и водохозяйственных факторов, а также процессов трансформации ландшафтов и не сводятся исключительно к загрязнению атмосферы и выбросам парниковых газов. Выявлены устойчивые зоны повышенной антропогенной нагрузки на атмосферные и водные экосистемы, прежде всего на территории Ставропольского края, что подтверждается ретроспективными статистическими данными и результатами современных экологических рейтингов. Рассмотрено, что ключевыми механизмами климатических трансформаций выступают усиление локального парникового эффекта, нарушение процессов тепло- и влагообмена, деградация почвенно-растительного покрова и изменение водного баланса, при этом орографические особенности Кавказа и гидрологические связи бассейнов р. Кума и Маныч обуславливают трансграничный характер климатических и геоэкологических последствий и способствуют распространению негативных эффектов на территорию Южного федерального округа, что обосновывает необходимость формирования комплексной межрегиональной политики адаптации и снижения антропогенной нагрузки с учетом природных и ландшафтных связей регионов Южной России.

Ключевые слова: климатические изменения, антропогенные факторы, геоэкологические последствия, Северо-Кавказский федеральный округ, Южный федеральный округ, Ставропольский край, Кумо-Манычская впадина, сельское хозяйство, транспорт, вырубка лесов

ASSESSMENT OF ANTHROPOGENIC FACTORS OF CLIMATE CHANGE AND THEIR GEOECOLOGICAL CONSEQUENCES IN THE REGIONS OF SOUTHERN RUSSIA

Lazovskiy A. I. ORCID ID 0009-0009-3025-796X, Mozhaev E. E.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Additional Professional Education
“Institute for Advanced Training of Managers and Specialists”,
Balashikha, Russian Federation, e-mail: lazovskiy.tolik@mail.ru*

In the context of accelerating climate change, the analysis of anthropogenic factors determining the regional features of climate change and related geoecological consequences is becoming particularly relevant. The study aims to identify and comprehensively assess the anthropogenic factors of climate change and their associated geo-ecological consequences in the regions of Southern Russia, using the North Caucasus and Southern Federal Districts as examples. The study is based on the analysis of statistical data from the Federal State Statistics Service, environmental ratings materials, monitoring data for atmospheric air and water bodies, as well as the results of modern scientific publications; methods of comparative, statistical and systematic analysis using geoecological and landscape approaches were used in the work. It has been established that climatic changes in the regions under consideration are formed under the influence of a combination of industrial, agricultural, transport and water management factors, as well as landscape transformation processes, and are not limited solely to atmospheric pollution and greenhouse gas emissions. The identified stable zones of increased anthropogenic pressure on atmospheric and aquatic ecosystems, primarily in the Stavropol Territory, which is confirmed by retrospective statistical data and the results of modern environmental ratings. It is considered that the key mechanisms of climatic transformations are the strengthening of the local greenhouse effect, disruption of heat processes- The orographic features of the Caucasus and the hydrological connections of the Kuma and Manych river basins determine the transboundary nature of climatic and geoecological consequences and contribute to the spread of negative effects on the territory of the Southern Federal District, which justifies the need to form a comprehensive interregional policy of adaptation and reduction of anthropogenic pressure, taking into account natural and environmental factors. landscape relations of the regions of Southern Russia.

Keywords: climate change, anthropogenic factors, geoecological consequences, North Caucasus Federal District, Southern Federal District, Stavropol Territory, Kuma-Manych Depression, agriculture, transport, deforestation

Введение

На сегодняшний день наблюдаются значительные и устойчивые изменения в климатической системе, выражающиеся в росте среднегодовой температуры воздуха, увеличении частоты экстремальных гидрометеорологических явлений и трансформации природных геосистем. Одной из наиболее распространенных и научно обоснованных гипотез, объясняющих высокую скорость климатических изменений в последние десятилетия, является гипотеза антропогенного воздействия. На первый взгляд большинство интерпретаций сводится преимущественно к загрязнению окружающей среды и росту выбросов парниковых газов [1, с. 7]. Однако более детальный анализ показывает, что антропогенное влияние на климатическую систему является многофакторным и включает широкий спектр хозяйственной деятельности, воздействующей на компоненты геосфер [2]. В условиях Северо-Кавказского федерального округа (СКФО), включающего Ростовскую область, Краснодарский и Ставропольский края, республики Адыгея, Дагестан, Ингушетия, Кабардино-Балкария, Карачаево-Черкесия, Северная Осетия – Алания и Чеченскую Республику, климатообразующее антропогенное воздействие формируется совокупностью промышленных, энергетических, транспортных, аграрных и градостроительных факторов. Значительный вклад вносят предприятия машиностроительного комплекса, авиационной и нефтегазовой промышленности, химического производства, цветной металлургии, а также производства строительных материалов и пищевой продукции. Помимо прямых выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов, существенное влияние оказывают изменения землепользования, деградация почв, урбанизация, рост транспортной нагрузки, водохозяйственная деятельность и нарушение естественных ландшафтных связей [3, с. 23].

Цель исследования – выявление и комплексная оценка антропогенных факторов климатических изменений и связанных с ними геоэкологических последствий в регионах Южной России на примере Северо-Кавказского и Южного федеральных округов.

Материалы и методы исследования

Для работы использовались официальные статистические данные Федеральной службы государственной статистики РФ, материалы экологических рейтингов, результаты мониторинга состояния атмос-

ферного воздуха и водных объектов, а также отечественные научные исследования и аналитические публикации, посвященные вопросам изменения климата и антропогенного воздействия на окружающую среду в Северо-Кавказском федеральном округе. Анализ проводился с применением методов статистического, сравнительного и системного анализа, а также элементов геоэкологического и ландшафтного подходов, что позволило выявить пространственные и отраслевые особенности антропогенной нагрузки, определить основные механизмы климатических изменений и оценить их последствия на региональном уровне. Исследование охватывало период с 2000 по 2020 г.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенный анализ показал, что климатические изменения в регионах Южной России формируются под влиянием совокупности антропогенных факторов, среди которых ключевую роль играют промышленность, сельское хозяйство, автомобильный транспорт и изменение характера землепользования. Полученные результаты свидетельствуют о том, что воздействие человека на климатическую систему носит комплексный характер и не ограничивается только выбросами загрязняющих веществ.

На основе статистических данных и материалов экологического мониторинга выявлены устойчивые зоны повышенной антропогенной нагрузки на атмосферные и водные экосистемы, наиболее выраженные в Ставропольском крае. Существенный вклад в ухудшение экологической обстановки в городах вносит автотранспорт, способствующий формированию локальных климатических аномалий и росту концентраций вредных примесей в приземном слое атмосферы.

Установлено, что интенсивное сельскохозяйственное освоение территорий приводит к деградации почвенно-растительного покрова, нарушению тепло- и влагообмена и усилению процессов засухливости. Выявлен трансграничный характер климатических и геоэкологических последствий, обусловленный орографическими особенностями Кавказа и гидрологическими связями бассейнов р. Кума и Маныч, что способствует распространению негативных эффектов за пределы Северо-Кавказского федерального округа и их проявлению на территории Южного федерального округа. Полученные результаты подчерки-

вают необходимость комплексного и согласованного подхода к снижению антропогенной нагрузки и адаптации регионов Южной России к современным климатическим изменениям.

Анализ экологической ситуации в Северо-Кавказском федеральном округе целесообразно начинать с рассмотрения ретроспективных статистических данных, отражающих формирование современной антропогенной нагрузки. В 2010–2017 гг. в субъектах СКФО наблюдалась неоднородная динамика выбросов загрязняющих веществ и сбросов загрязненных сточных вод, что наглядно представлено в табл. 1 и 2.

Согласно данным табл. 1, характеризующей выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников по отношению к 2007 г., в целом

по округу фиксируется тенденция к относительному снижению выбросов. Однако Ставропольский край на фоне большинства регионов СКФО демонстрирует рост показателей в завершающие годы анализируемого периода, что указывает на усиление промышленной и агропромышленной деятельности и увеличение нагрузки на атмосферный воздух.

Анализ табл. 2, отражающей сброс загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты, показывает, что Ставропольский край на протяжении всего рассматриваемого периода относится к числу регионов с наибольшими объемами водного загрязнения. Это свидетельствует о хронической нагрузке на водные экосистемы и недостаточной эффективности систем очистки сточных вод.

Таблица 1

Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, отходящих от стационарных источников по отношению к 2007 г. (2010–2017 гг.)

Северо-Кавказский федеральный округ	67,4	56,9	66,3	70,8	70,8	68,4	73,0	72,3
Республика Дагестан	110,0	102,7	111,5	96,7	78,8	65,2	84,4	83,2
Республика Ингушетия	40,6	10,2	152	48,2	33,0	33,1	87,7	87,6
Кабардино-Балкарская Республика	109,3	94,5	1022	85,7	90,5	117,9	153,8	118,4
Карачаево-Черкесская Республика	100,9	127,7	111,2	105,5	78,8	73,6	86,1	83,8
Республика Северная Осетия – Алания	108,0	75,0	81,5	93,3	64,0	98,0	84,3	71,0
Чеченская Республика	27,8	22,4	21,0	23,8	34,8	22,9	23,4	16,8
Ставропольский край	94,9	90,1	1000	108,3	1139	123,4	126,9	136,6

Примечание: составлена автором на основе: Федеральная служба государственной статистики. Регионы России. Основные характеристики субъектов Российской Федерации: статистический сборник. М., 2018. 751 с.

Таблица 2

Сброс загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты

Северо-Кавказский федеральный округ	496	370	397	395	374	368	362	364	358
Республика Дагестан	78	77	78	79	77	78	79	77	72
Республика Ингушетия	1,6	2,7	4,3	4,2	4,1	3,8	2,2	2,6	2,7
Кабардино-Балкарская Республика	47	33	32	30	29	29	28	29	29
Карачаево-Черкесская Республика	53	51	47	45	45	41	42	42	42
Республика Северная Осетия – Алания	96	82	97	107	87	84	88	88	86
Чеченская Республика	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ставропольский край	220	144	138	131	133	132	123	125	125

Примечание: составлена автором на основе: Федеральная служба государственной статистики. Регионы России. Основные характеристики субъектов Российской Федерации: статистический сборник. М., 2018. 751 с.

Сформировавшиеся в предыдущие годы тенденции во многом предопределили современное состояние экологической ситуации в регионе. По итогам осени 2025 г. Ставропольский край занял 55-е место из 85 субъектов Российской Федерации в Национальном экологическом рейтинге и последнее, 7-е место среди регионов Северо-Кавказского федерального округа. Низкая позиция региона обусловлена совокупностью факторов, включая регулярные превышения концентраций взвешенных веществ и диоксида азота в атмосферном воздухе, загрязнение поверхностных водных объектов, а также рост антропогенной нагрузки со стороны промышленного и аграрного секторов.

Сопоставление ретроспективных статистических данных с современными рейтинговыми оценками подтверждает наличие устойчивых геоэкологических проблем в Ставропольском крае, связанных с загрязнением атмосферного воздуха и водных ресурсов, что оказывает негативное влияние на экологическую устойчивость территории и формирование климатических и экологических рисков [4; 5].

В 2021 г. промышленная нагрузка на атмосферу в Северо-Кавказском федеральном округе демонстрировала значительное усиление антропогенного воздействия, несмотря на относительно невысокие абсолютные объемы выбросов в сравнении с крупными регионами России. Общероссийский объем промышленных выбросов составил 17,2 млн т, что на 1,5% больше, чем в предыдущем году, при этом количество предприятий-загрязнителей увеличилось на 15% и достигло 131,2 тыс. объектов. В СКФО наблюдалась разнонаправленная динамика: наибольший относительный прирост числа предприятий – источников загрязнения зафиксирован в Кабардино-Балкарии – в 2 раза, до 219 объектов, в Ингушетии – +52,2% (102 объекта), в Чечне – +38,5% (90 объектов). По абсолютному приросту новых предприятий, оказывающих негативное воздействие на атмосферу, Ставропольский край занял 8-е место среди всех регионов России, с 482 новыми «предприятиями-загрязнителями» [6].

Рост числа источников выбросов связан не только с расширением производства, но и с формальным выводом из «тени» ранее неучтенных объектов, а также с увеличением выбросов действующих предприятий, превысивших лимиты, позволяющие не сдавать экологическую отчетность. Наибольшее влияние на атмосферу оказывает

энергетика, добыча нефти и газа, а также металлургическая промышленность, что согласуется с профилем промышленного комплекса СКФО, включающего машиностроение, авиационную, нефтегазовую и химическую промышленность.

Сельское хозяйство является одним из ключевых факторов антропогенного воздействия на климат и экосистемы Северо-Кавказского федерального округа. Использование азотных удобрений, пестицидов и гербицидов приводит к увеличению выбросов закиси азота (N_2O) и метана, загрязнению почв и водных объектов. Интенсивное животноводство усиливает эмиссию метана, а значительная часть пашен в Ставропольском крае подвергается химическому загрязнению, что нарушает биогеохимические циклы и снижает плодородие почв. Избыточное накопление нитратов в растениях и почве может переноситься в пищевые продукты и мясо животных, создавая риски для здоровья человека. Пестициды, обладая стойкостью к температуре и влаге, распространяются на значительные территории, а большинство их компонентов не выполняют заявленную функцию, создавая долгосрочную нагрузку на экосистемы.

Повышенные концентрации тяжелых металлов, бензпирена и нефтепродуктов в почвах сельскохозяйственных угодий оказывают токсическое воздействие на растения, животных и человека, ухудшают микробиологический состав почв и нарушают корневое питание растений. Эмиссия закиси азота, главного парникового газа сельского хозяйства, растет ежегодно на 1,4%, что угрожает выполнению целей Парижского соглашения. При этом около половины антропогенных выбросов N_2O приходится на синтетические удобрения, а треть – на навоз, при этом косвенные выбросы через атмосферу и стоки составляют до 15% [7; 8].

Кроме прямого химического воздействия сельское хозяйство вызывает значительные изменения ландшафтов: вырубка лесов, распашка земель, мелиорация, чрезмерный выпас скота приводят к деградации почв, водной эрозии, опустыниванию и уничтожению естественных мест обитания многих видов. Интенсивное сельское производство также создает негативные экстерналии для смежных отраслей – загрязнение воды и почв влияет на другие хозяйства, снижает продуктивность земель и ухудшает качество продукции [9, с. 13].

Для частичного или начального этапа можно рассмотреть переход к технологиям точного земледелия, органическому и почвозащитному земледелию, рациональному использованию удобрений и пастбищ, восстановлению биогеохимических циклов и экосистемного равновесия, так как такая проблема не решается за один раз и требует гораздо большего количества времени для своего решения. Только комплексное управление агроэкологическими рисками позволит сохранить плодородие почв, чистоту водных ресурсов и снизить вклад сельского хозяйства в изменение климата региона.

В городах Северо-Кавказского и Южного федеральных округов, таких как Ставрополь, Краснодар, Ростов-на-Дону и Нальчик, автомобильный транспорт является основным источником загрязнения атмосферного воздуха. Доля транспортных выбросов в регионе достигает 74% от общего антропогенного загрязнения, что оказывает прямое влияние на локальный парниковый эффект и изменение микроклимата. Результаты ежегодных исследований Росгидромета и Главной геофизической обсерватории им. А. И. Войтека показывают превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) взвешенных веществ, формальдегида и диоксида азота в отдельных городах Ставропольского края. В 203 из 253 городов страны, охваченных мониторингом, уровень загрязнения атмосферы превышает безопасные показатели, что подчеркивает актуальность проблемы для южного региона России [10; 11].

Автотранспорт выделяет в атмосферу широкий спектр токсичных веществ: угарный газ (CO), оксиды азота (NO_x), углеводороды (C_xH_y), оксиды серы (SO_x), сажу и аэрозоли, соединения тяжелых металлов (свинец, кадмий), канцерогены и парниковые газы, включая двуокись углерода (CO₂). Эти компоненты обладают токсическим, мутагенным и тератогенным действием, способствуют формированию смога и кислотных дождей, усиливают парниковый эффект, повышая температуру у поверхности Земли, что, в свою очередь, приводит к ускорению таяния ледников и повышению уровня Мирового океана [12].

Расчеты выбросов автотранспорта на примере города Нальчика показывают, что за 1 ч движения 1110 автомобилей по маршруту длиной 100 м каждый выделяют 6,66 л CO, 1,11 л углеводородов и 0,444 л NO₂. На ул. Осетинской с 1230 машинами показатели выбросов составляют 7,38 л CO,

1,23 л углеводородов и 0,492 л NO₂ за час. Эти значения превышают среднесуточные ПДК, и это только на ограниченных участках и вне часов пик, что демонстрирует высокую локальную нагрузку на атмосферу.

Рост числа автомобилей напрямую увеличивает нагрузку на городские экосистемы. В Нальчике с 2011 по 2014 г. количество автотранспортных средств выросло с 191 676 до 241 848 ед. Одновременно увеличилось число автосервисов и автомоек, большинство которых работают без систем очистки сточных вод, что приводит к загрязнению почв и поверхностных вод нефтепродуктами. Стихийные автостоянки без твердого покрытия, ливневой канализации и озеленения усугубляют эрозию почв, ухудшают водный режим и создают дополнительные риски для городской биоты [13].

Автомобильные выбросы оказывают геоэкологическое воздействие:

1. На здоровье человека – высокий уровень CO, NO_x и взвешенных веществ вызывает снижение иммунитета, рост заболеваемости органов дыхания, сердечно-сосудистых заболеваний, аллергий и онкологических процессов; до 30% заболеваний горожан связано с воздействием выхлопных газов.

2. На почвы и водные объекты – нефтепродукты, тяжелые металлы и химические соединения, стекающие с автомоек и автостоянок, нарушают биохимические циклы почв, ухудшают плодородие и загрязняют водные ресурсы, усиливая эвтрофикацию и снижая биологическое разнообразие водоемов.

3. На флору и фауну – токсичные аэрозоли и смог снижают видовое разнообразие растений и животных, нарушают экосистемные функции городских зеленых зон и естественных биотопов.

Климатические последствия – локальное повышение температуры и концентрации парниковых газов в сочетании с высокой солнечной инсоляцией регионов СКФО усиливает термическое напряжение, способствует микроклиматическим аномалиям, повышает риск засух и снижает устойчивость агроэкосистем.

Анализ социального опроса в Нальчике показывает, что 73% населения имеют личный транспорт, 75% предпочитают передвигаться на автомобиле, и лишь 34,2% признают реальную угрозу загрязнения атмосферы, несмотря на актуальность проблемы. Это указывает на сочетание высокого антропогенного давления с недостаточной экологической осведомленностью и низкой экологической инициативой населения [14].

Таблица 3

Антропогенные факторы климатических изменений
и геоэкологические последствия (СКФО – ЮФО)

Антропогенный фактор	Механизм влияния на климат (СКФО)	Геоэкологические последствия в СКФО	Связь и трансграничное влияние на ЮФО
Промышленные и энергетические выбросы	Рост концентраций CO ₂ , NO _x , аэрозолей, что дает усиление парникового эффекта и радиационного дисбаланса	Ухудшение качества воздуха, рост температурных аномалий в предгорьях и межгорных котловинах	Перенос аэрозолей и газов воздушными массами через Кумо-Манычскую впадину в степные районы ЮФО (Ростовская обл.)
Сельское хозяйство (удобрения, животноводство)	Эмиссия N ₂ O и CH ₄ , нарушение углеродно-азотных циклов	Деграция почв, засоление, снижение влагоудерживающей способности ландшафтов	Усиление аридизации степей ЮФО, рост засушливости и пыльных бурь
Автомобильный транспорт	Локальный парниковый эффект, формирование тепловых островов	Повышение температур в городах, загрязнение почв и воздуха	Аэрозольный перенос загрязнений в приграничные степные зоны ЮФО
Изменение землепользования (распашка, урбанизация)	Снижение альбедо, рост испарения, нарушение тепло- и влагообмена	Усиление эрозии, опустынивание предгорных районов	Расширение зон сухих степей в ЮФО, деграция агроландшафтов
Вырубка лесов в предгорьях и горах	Потеря влагонакопления, рост поверхностного стока, снижение влажности воздуха	Высыхание родников, усиление эрозии, селевые и оползневые процессы	Снижение речного и подземного стока, питающего равнинные территории ЮФО
Водохозяйственная деятельность	Регулирование стока, испарение с водохранилищ	Изменение локального микроклимата, деграция водных экосистем	Нарушение водного баланса Кумо-Манычской впадины и орошаемых земель ЮФО

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

В Северо-Кавказском федеральном округе наблюдаются интенсивные заготовки древесины в предгорных и горных районах, что приводит к разрежению лесных массивов и сокращению лесного покрова. Это оказывает прямое воздействие на локальный климат: уменьшается задержка влаги в экосистеме, снижается влажность воздуха и почвы, ускоряется испарение, изменяется микроклимат предгорий и горных долин. Разрежение лесов приводит к высыханию родников, снижению подпитки речных и подземных водных систем и увеличению риска эрозии почв, что создает условия для формирования селевых потоков и лавин. Данные процессы негативно влияют на устойчивость местных экосистем и уменьшают способность природных ландшафтов поддерживать стабильный водно-климатический режим [15].

Сопоставление антропогенных факторов, представленных в таблице, свидетельствует о том, что климатические изменения в пределах Северо-Кавказского федерального округа носят комплексный, иерархически организованный характер и проявляются за его пределами, включая территорию

Южного федерального округа. Воздействие каждого фактора реализуется не обособленно, а через систему взаимосвязанных физико-географических и геоэкологических процессов, что приводит к формированию выраженного комплексного эффекта.

Промышленное и энергетическое загрязнение атмосферы в СКФО, несмотря на сравнительно умеренные абсолютные объемы выбросов, оказывает непропорционально высокое влияние на региональный климат вследствие орографических особенностей Кавказа. Горные и предгорные территории способствуют аккумуляции аэрозолей и газов в приземном слое атмосферы, что усиливает локальный парниковый эффект и приводит к изменению температурного режима. Через систему господствующих воздушных переносов загрязняющие вещества транслируются в северном направлении, преодолевая Кумо-Манычскую впадину – естественный аэродинамический коридор между СКФО и ЮФО. В результате антропогенное воздействие приобретает надрегиональный характер, влияя на климатические условия степных районов ЮФО.

Сельскохозяйственная деятельность выступает одним из ключевых факторов климатических изменений, поскольку напрямую затрагивает биогеохимические циклы. Эмиссия закиси азота и метана, деградация почвенного покрова и сокращение органического углерода в почвах приводят к снижению их климаторегулирующей функции. В условиях СКФО это проявляется в усилении процессов аридизации и потере влагонакопительного потенциала ландшафтов. Такие процессы не ограничиваются границами округа: деградация предгорных и равнинных агроландшафтов способствует расширению зоны сухих степей ЮФО, что подтверждает наличие функциональной климатической связи между двумя федеральными округами.

Транспортный фактор формирует преимущественно локальные климатические аномалии, однако их пространственное распространение обусловлено плотностью застройки и конфигурацией рельефа. Формирование «островов тепла» в городах СКФО сопровождается ростом приземных температур и изменением циркуляции воздуха. Через аэрозольный перенос и вторичные химические реакции данные изменения оказывают влияние на приграничные территории ЮФО, усиливая загрязнение атмосферы в условиях равнинного рельефа и слабой вентиляции воздуха.

Особое значение имеет изменение землепользования и сокращение лесного покрова в предгорных и горных районах СКФО. Леса выполняют ключевую климаторегулирующую функцию, обеспечивая аккумуляцию влаги, стабилизацию температурного режима и поддержание устойчивого стока. Их деградация приводит к высыханию родников, снижению подпитки рек и подземных вод, усилению эрозионных процессов. Учитывая, что водосборы р. Кума и Маныч формируются в пределах СКФО, данные изменения прямо отражаются на водном балансе Кумо-Манычской впадины и прилегающих территорий ЮФО, где возрастает дефицит влаги и уязвимость агроландшафтов к засухам.

Заключение

Проведенный анализ антропогенных факторов климатических изменений и их геоэкологических последствий в регионах Южной России показал, что современные климатические трансформации в пределах Северо-Кавказского и Южного федеральных округов имеют комплексный, многофакторный и пространственно взаимосвя-

занный характер. Полученные результаты подтверждают, что антропогенное воздействие на климатическую систему не может быть сведено исключительно к загрязнению окружающей среды или росту выбросов парниковых газов, а формируется совокупностью промышленных, аграрных, транспортных, водохозяйственных и ландшафтно-преобразующих процессов.

Ретроспективный анализ статистических данных по выбросам загрязняющих веществ и сбросам сточных вод выявил устойчивую антропогенную нагрузку на атмосферные и водные экосистемы СКФО, особенно в Ставропольском крае, что коррелирует с его неблагоприятными позициями в современных экологических рейтингах. Установлено, что даже при относительном снижении отдельных показателей в целом по округу сохраняются очаги повышенного экологического риска, способные формировать климатические и геоэкологические угрозы регионального масштаба.

Исследование показало, что ключевыми механизмами климатических изменений в СКФО являются усиление локального парникового эффекта, трансформация тепло- и влагообмена, деградация почвенно-растительного покрова и нарушение водного баланса. Особую роль играют сельское хозяйство и изменение землепользования, поскольку именно эти виды деятельности затрагивают фундаментальные биогеохимические циклы и снижают климаторегулирующую устойчивость природных ландшафтов. Существенный вклад в формирование микроклиматических аномалий вносят автомобильный транспорт и урбанизация, создающие «острова тепла» и усиливающие загрязнение приземного слоя атмосферы.

Важным результатом работы является установление трансграничного характера климатических и геоэкологических последствий. Показано, что природно-географические особенности СКФО: горный рельеф, предгорные зоны и водосборы рек Кума и Маныч – обуславливают перенос антропогенных эффектов за пределы округа. Через атмосферную циркуляцию и гидрологические связи негативные последствия реализуются в Южном федеральном округе, прежде всего в степных и аграрных районах, усиливая процессы аридизации, дефицита влаги и деградации агроландшафтов. Кумо-Манычская впадина в данном контексте выступает не только административной, но и функциональной природной границей, через которую осуществляется трансляция

климатических изменений. Это обосновывает необходимость перехода от фрагментарных региональных мер к комплексной межрегиональной политике адаптации и снижения антропогенной нагрузки, основанной на учете природных связей, ландшафтной структуры и климатической уязвимости территории.

Практическая значимость исследования состоит в том, что его результаты могут быть использованы при разработке региональных и межрегиональных мер по адаптации к климатическим изменениям и снижению антропогенной нагрузки на окружающую среду. Выявленные пространственные закономерности и ключевые факторы воздействия представляют ценность для органов власти субъектов СКФО и ЮФО при территориальном планировании, экологическом нормировании, развитии систем экологического мониторинга, а также при управлении водными и земельными ресурсами. Полученные выводы могут быть полезны специалистам в области геоэкологии, климатологии и природопользования, а также применимы в аграрной и водохозяйственной практике при внедрении почвозащитных и ресурсосберегающих технологий. Материалы исследования могут использоваться в научной и образовательной деятельности при подготовке специалистов экологического и географического профиля и при оценке региональных климатических и экологических рисков.

Список литературы

1. Глобальное изменение климата и Северо-Кавказский федеральный округ. На пути к адаптации / Климатический центр Росгидромета; Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). СПб.: Научное издание, 2021. 12 с. ISBN 978-5-6047504-4-5.
2. Борзенкова И. И., Будыко М. И., Бютнер Э. К. и др. Антропогенные изменения климата. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 405 с.
3. Дмитриев Я. С. Влияние метеорологических условий на загрязнение воздуха в городе Ростове-на-Дону: дис. бакалавра / ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», кафедра МКОА. Санкт-Петербург, 2020. 48 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3RRNju> (дата обращения: 16.01.2026).
4. Три региона СКФО вошли в топ-10 в РФ с низкими объемами вредных выбросов // РБК Кавказ. 17 мая 2022. 18:30. URL: <https://kavkaz.rbc.ru/kavkaz/17/05/2022/6283bed59a79470f26f26ee1> (дата обращения: 16.01.2026).
5. Ставропольский край показал худший в СКФО результат в экологическом рейтинге // Коммерсантъ. 2025. 22 декабря. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/8313619> (дата обращения: 09.01.2026).
6. Афанасьева Е. В., Якубов Р. Л. Анализ экологической ситуации Северо-Кавказского федерального округа // Тенденции развития науки и образования. 2019. № 49. С. 8–10. URL: <https://doicodex.ru/doi/10.18411/tj-04-2019-147> (дата обращения: 09.01.2026). DOI: 10.18411/tj-04-2019-147.
7. Лифаренко Н. Выхлопные газы: чем опасен туман, захватывающий планету // Наука Mail. Экология. 28 июня 2025. URL: <https://science.mail.ru/articles/4124-vykhlopnyegazy/> (дата обращения: 17.01.2026).
8. Эксперты предупредили, что интенсивное сельское хозяйство может помешать борьбе с изменением климата // +1 (RBC). [Электронный ресурс]. URL: <https://plus-one.rbc.ru/ecology/intensivnoe-selskoe-hozyaystvo-pomeshayet-borbe-s-izmeneniyem-klimata> (дата обращения: 20.01.2026).
9. Камилов М. К., Камилова П. Д., Камилова З. М. Экологические проблемы в сельском хозяйстве как следствие интенсификации развития агропромышленного комплекса // Экономика и управление народным хозяйством. Экономика, организация и управление предприятиями, отраслями, комплексами. АПК и сельское хозяйство. 2017. № 1. С. 11–20. DOI: 10.26726/2305-4484-2017-1-11-20.
10. Превышение вредных веществ в атмосфере выявили в некоторых городах Ставрополья // Ставрополь Медиа. [Электронный ресурс]. URL: <https://stavropol.media/news/2293580/> (дата обращения: 09.01.2026).
11. Жесткова Д. Б. Состав и структура травянистого покрова крупного промышленного города: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08 Экология. Нижний Новгород, 2016. Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского.
12. Колесникова Д. С., Петухова В. С. Воздействие нефти и нефтепродуктов на свойства почв и растений // Вестник науки. 2024. Т. 3. № 12 (81). С. 2112–2116. URL: <https://www.vestnik-nauki.pf/article/19999> (дата обращения: 20.01.2026). ISSN 2712-8849.
13. Крахмаль А. Е., Волков И. В. Влияние автомобильного транспорта на экологию Кабардино-Балкарской Республики (на примере г. Нальчика) // Международный школьный научный вестник. 2016. № 1. URL: <https://school-herald.ru/ru/article/view?id=26> (дата обращения: 10.01.2026).
14. Скрипникова И. В. Эколого-экономический механизм снижения воздействия автотранспорта на воздушную среду. Туапсе: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2021. 52 с. [Электронный ресурс]. URL: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_454b2a1b98e742db8bc6e5aff85df662.pdf (дата обращения: 20.01.2026).
15. Бабенко И. В., Максименко Л. С., Капустина Н. В., Перцукова У. А. Оценка инновационного потенциала регионов Северо-Кавказского федерального округа // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16. № 3. URL: <https://esj.today/PDF/20FAVN324.pdf> (дата обращения: 10.01.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

СТАТЬИ

УДК 504.054
DOI 10.17513/use.38477



CC BY 4.0

**ОСОБЕННОСТИ ЗОНИРОВАНИЯ
ОПАСНЫХ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ЗАДАЧАХ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА**

Лавренчук В. А.

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина»,
Москва, Российская Федерация, e-mail: lavrenchuk.v.a@mail.ru*

Контроль изменений геологической среды на месторождениях углеводородов включает геодинамический, геокриологический, геотехнический, гидрогеологический и экологический мониторинг. Комплексная оценка геологической среды требует использования единого подхода, учитывающего совместное воздействие опасных геоэкологических процессов. Угрозы глобального потепления, активизация опасных природных процессов и увеличение техногенной нагрузки обуславливают актуальность геоэкологического зонирования. Целью исследований является анализ, обоснование и апробация подходов к зонированию опасных природных и техногенных процессов в задачах геоэкологического мониторинга месторождений нефти и газа. Рассмотрены применяемые формы дифференциации территории месторождений, связанные с обеспечением промышленной и экологической безопасности. Предложена формулировка определения геоэкологического зонирования территории. Апробация геоэкологического зонирования проведена на примере Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения. Использованы методы анализа научных материалов и результатов геоэкологического мониторинга, дистанционного зондирования Земли, линейного анализа территории с применением специализированной геоинформационной системы. Проседание горных пород на месторождении связывается с добычей углеводородов. Выявлена потребность дополнительного анализа причин геодинамических подвижек, с учетом геокриологических изменений, в том числе обусловленных температурными трендами приземного слоя атмосферы, вызванными эмиссией парниковых газов. Зонирование опасных геоэкологических процессов призвано минимизировать чрезвычайные ситуации, повысить эффективность инженерной защиты сооружений, распределения финансовых и материальных ресурсов, разработки инновационных природоохранных технологий и способствовать скорейшему решению геоэкологических проблем.

Ключевые слова: опасные природные процессы, опасные техногенные процессы, геоэкологический мониторинг, зонирование, опасные геодинамические процессы, опасные геокриологические процессы, геологическая среда

**FEATURES OF ZONING OF DANGEROUS
GEOECOLOGICAL PROCESSES IN GEOECOLOGICAL
MONITORING OF OIL AND GAS DEPOSITS**

Lavrenchuk V. A.

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
«Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)»,
Moscow, Russian Federation, e-mail: lavrenchuk.v.a@mail.ru*

Control of changes in the geological environment at hydrocarbon fields includes geodynamic, geocryological, geotechnical, hydrogeological, and environmental monitoring. A comprehensive assessment of the geological environment requires a unified approach that considers the combined impact of hazardous geoecological processes. The threats of global warming, the intensification of hazardous natural processes, and the increasing anthropogenic load underscore the relevance of geoecological zoning. The objective of the research is to analyze, justify, and test approaches to zoning hazardous natural and anthropogenic processes in the context of geoecological monitoring of oil and gas fields. Applied forms of territory differentiation related to ensuring industrial and environmental safety are considered. A definition of geo-ecological zoning of the territory has been proposed. The geoecological zoning was tested using the Urengoy oil and gas condensate field as an example. Methods of analyzing scientific materials and the results of geo-ecological monitoring, remote sensing of the Earth, and linear analysis of the territory using a specialized geographic information system were used. The need for additional analysis of the causes of geodynamic movements has been identified, considering geocryological changes, including those caused by temperature trends in the atmospheric boundary layer, driven by greenhouse gas emissions. Zoning of hazardous geoecological processes is intended to minimize emergencies, increase the efficiency of engineering protection of structures, allocate financial and material resources, develop innovative environmental protection technologies, and contribute to the prompt resolution of geoecological problems.

Keywords: hazardous natural processes, hazardous anthropogenic processes, geo-ecological monitoring, zoning, geological environment, hazardous geodynamic processes, hazardous geocryological processes

Введение

Важным элементом устойчивого развития территорий нефтегазового комплекса (НГК) является учет воздействия опасных природных и техногенных геоэкологических факторов. Серьезную потенциальную угрозу для природных систем и безопасности людей представляет глобальное потепление [1]. Наиболее остро геоэкологические проблемы, связанные с изменением климата, проявляются в Арктической зоне. Арктические территории отличаются суровыми климатическими условиями, наличием многолетней мерзлоты, геодинамически активных зон, переувлажнением, низкой биологической продуктивностью, низким восстановительным потенциалом и повышенной уязвимостью ландшафтов. Наряду с активизацией природных источников в Арктике происходит увеличение интенсивности техногенной нагрузки на окружающую среду (ОС).

В настоящее время на территории месторождений нефти и газа для контроля геологической среды используются системы геодинамического, геокриологического, геотехнического, гидрогеологического и экологического мониторинга, которые выполняются различными подразделениями организаций. Для решения задач оценки параметров геологической среды целесообразно использование системного подхода к решению задач геоэкологического мониторинга в рамках единой автоматизированной системы наблюдения за источниками опасных природных и техногенных процессов (ОПТП).

На данный момент понятия «геоэкологический мониторинг» и «геологическая среда» в нормативных документах РФ строго не закреплены и трактуются по-разному различными авторами. В вышеуказанном аспекте целесообразно упомянуть определение одного из основоположников мониторинга геологической среды Королева В. А., 1995 г., в котором он под мониторингом геологической среды понимал систему постоянных наблюдений, оценки, прогноза и управления геологической средой или какой-либо ее частью, проводимую по заранее намеченной программе в целях обеспечения оптимальных экологических условий для человека в пределах рассматриваемой природно-технической системы¹.

В современных определениях геоэкологический мониторинг представлен как система наблюдений, оценки, прогноза и

управления изменениями окружающей человека среды, вызванными природными и антропогенными факторами, в том числе техногенным воздействием. В современных определениях геоэкологического мониторинга подчеркивается его междисциплинарный характер, интеграция с новыми технологиями и ориентация на устойчивое управление природными ресурсами.

Для выявления позиции зонирования опасных геоэкологических процессов перечислим основные задачи геоэкологического мониторинга при освоении подземного пространства (задачи детально рассмотрены Е. Ю. Куликовой, 2013 г.):

- получение данных о состоянии, свойствах и структуре геологической среды в районе размещения подземного сооружения и смежных районах;
- организация контроля и наблюдения за изменениями геологической среды, обусловленными горно-строительной деятельностью;
- обеспечение всех заинтересованных организаций своевременной информацией о состоянии геологической среды в районе освоения подземного пространства и ее изменениях;
- оценка количественных и качественных изменений геологической среды и тенденций их развития на протяжении всего жизненного цикла подземного сооружения;
- моделирование и составление прогнозов (кратко- и долгосрочных) изменения геологической среды под влиянием подземного строительства;
- оценка реакции экосистем на различные типы изменений состояния геологической среды, связанные, главным образом, с горно-строительными процессами;
- обеспечение задач управления использованием геологической среды необходимой информацией [2].

За основу термина «геологическая среда» в данной работе принято определение геологической среды по Сергееву Е. М., 1979: «геологическая среда – это верхняя часть литосферы, которая рассматривается как многокомпонентная динамическая система, находящаяся под воздействием инженерно-хозяйственной деятельности человека и, в свою очередь, в известной степени определяющая эту деятельность» [3]. Перечисление компонентов, составляющих геологическую среду, приведено в определении СП 47.13330.2016, согласно которому геологическая среда – это верхняя часть литосферы, представляющая собой многокомпонентную динамическую систему (горные породы, подземные воды, газы, физические

¹ Королев В. А. Мониторинг геологической среды: учебник / Под редакцией В. Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 1995.

поля – тепловые, гравитационные, электромагнитные, сейсмические)². В качестве верхних границ геологической среды часто принимаются ландшафты, рельеф, почвы, а нижняя граница обуславливается уровнем развития науки и техники.

Включая во внимание ограничения указанных выше определений, предлагается подчеркнуть роль приземного слоя атмосферы (концентрируясь в данном случае на его влиянии как абиотического фактора) в части его воздействия на параметры криолитозоны и состояние горных пород. В приземном слое осуществляется непосредственное взаимодействие атмосферы с земной поверхностью и имеет место влияние активных геологических и техногенных процессов. Учитывая происходящие в настоящее время климатические изменения, данный аспект особенно актуален для добывающей отрасли, осуществляющей деятельность, непосредственно связанную с состоянием грунтов, и имеющей такие источники негативного воздействия на атмосферный воздух, как факельные установки, дизельные агрегаты и т.п.

В настоящее время в российском законодательстве закреплены понятия государственного мониторинга состояния недр и мониторинга состояния недр на участке недр, предоставленном в пользование. Государственный мониторинг состояния недр является частью государственного экологического мониторинга и включает: мониторинг подземных вод; мониторинг опасных экзогенных геологических процессов; мониторинг опасных эндогенных геологических процессов; мониторинг состояния недр^{3,4}. Информация о результатах государственного мониторинга состояния недр консолидируется в Федеральной государственной информационной системе состояния окружающей среды. Важно подчеркнуть, что в составе размещаемых в федеральной системе материалов присутствует информация о проявлениях и прогнозе развития экзогенных геологических процессов по территории РФ, об оценке изменений геодинамического состояния недр и степени сейсмической опасности сейсмоопасных

регионов России, а также об оценке состояния и прогнозирования региональной активности опасных геологических процессов⁵.

Мониторинг атмосферного воздуха является частью экологического мониторинга и нацелен на своевременное выявление изменений, угроз и превышений предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. С 2015 года в РФ был введен мониторинг выбросов парниковых газов (ПГ). Особую актуальность вопрос мониторинга ПГ приобрел в свете массовой ликвидации скважин добычи углеводородов во всем мире. Тема активно обсуждается научным сообществом, так как связана с процессом глобального энергетического перехода и имеет международное значение. В зарубежных странах подлежит учету эмиссия ПГ, источниками которой являются ликвидированные скважины.

Одновременная активизация природных и техногенных источников ЧС требует разработки превентивных мер экологической и промышленной безопасности. Решение задач геоэкологического мониторинга предполагает выделение участков (зон) проявления ОПТП для оптимизации проведения мониторинговых наблюдений на выявленных территориях. Для этого целесообразно формирование «информационной системы» регулярного наблюдения, оценки и прогноза изменений состояния геологической среды, обусловленных природными и техногенными факторами, на протяжении всего жизненного цикла месторождения.

Целью исследований является анализ, обоснование и апробация подходов к зонированию опасных природных и техногенных процессов в задачах геоэкологического мониторинга территории месторождений нефти и газа.

Материалы и методы исследования

В процессе геоэкологического зонирования осуществляется выявление геоэкологических опасных процессов, анализ причин, факторов, влияющих на их проявление, оценка уровня опасности и установление границ распространения. Для этого целесообразно исследование комплекса показателей природных и техногенных опасностей. Зонирование ОПТП осуществляется начиная с этапа инженерных изысканий, затем результаты изысканий используются в процессе геоэкологического мониторинга и оцен-

² Свод правил СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения», утв. Приказом Минстроя РФ от 30.12.2020 № 909/пр.

³ Закон Российской Федерации от 21 февраля 1992 г. № 2395-1 «О недрах».

⁴ Постановление Правительства РФ от 29.11.2023 г. № 2029 «Об утверждении Правил осуществления государственного мониторинга состояния недр и мониторинга состояния недр на участке недр, предоставленном в пользование».

⁵ Постановление Правительства РФ от 19.03.2024 № 329 «О федеральной государственной информационной системе состояния окружающей среды».

ки геоэкологических рисков территории на всех стадиях освоения месторождения.

Практическая апробация зонирования ОПТП в задачах геоэкологического мониторинга месторождений нефти и газа проведена на примере объектов Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (УНГКМ). Проанализированы особенности геологического строения, тектонической структуры, геологическая модель залежей углеводородов, природно-климатические и технологические особенности месторождения в аспекте основных геоэкологических проблем, а также источники и модели ОПТП.

Развитие систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и геоинформационных технологий обуславливают возможность их применения для обеспечения комплексных геоэкологических наблюдений. Для выделения зон опасных геоэкологических процессов были использованы методы ДЗЗ, обеспечивающие контроль геодинамических, геокриологических процессов, загрязнения атмосферного воздуха, в том числе эмиссии ПГ, а также загрязнения нефтью и нефтепродуктами почвы и водоемов территории нефтегазопромыслов.

В процессе исследования территории промыслов накапливается огромный объем ценной информации, для оптимизации дальнейшего использования которой одним из перспективных способов является применение геоинформационных систем (ГИС). Использование специализированных ГИС обеспечивает возможность моделирования событий и выделения зон особого риска. ГИС выступают инструментами работы с информацией, то есть технические и программные средства используются для преобразования исходной информации, ее хранения, обработки и представления в удобном для пользования виде. Применение систем ДЗЗ и специализированных геопорталов мониторинговых наблюдений позволяет существенно дополнить, а в ряде задач заменить натурные полевые исследования бесконтактными дистанционными методами наблюдений индикаторов ОПТП [4].

Представленный подход ориентирован на использование визуализации моделирующих процедур ГИС в задачах управления безопасностью объектов НГК. В его основе лежит разработка поисковой системы, содержащей информацию о геопространственных и функциональных параметрах объектов НГК и идентификаторах опасных геоэкологических процессов. В процессе интерпретации полученных

материалов происходит выявление зон опасных геоэкологических процессов, открывающее возможности для дальнейшего моделирования ситуации, оценки геоэкологических рисков и планирования мероприятий промышленной и экологической безопасности. Реализация данного подхода обеспечивает сокращение потерь за счет применения обоснованных инженерно-технических решений.

Результаты исследования и их обсуждение

В настоящее время законодательством РФ предусмотрены следующие формы дифференциации территории, связанные с обеспечением промышленной и экологической безопасности.

Вокруг предприятий I и II класса опасности устанавливаются санитарно-защитные зоны (СЗЗ)⁶. Экспертиза проектов СЗЗ осуществляется с учетом расчетов рассеивания загрязнений атмосферного воздуха и физических воздействий на атмосферный воздух (шум, вибрация, электромагнитные поля и пр.).

Территория объектов обустройства нефтяных и газовых месторождений с учетом функционального назначения и уровня пожаровзрывоопасности делится на следующие основные зоны: I зона (производственного назначения); II зона (подсобно-вспомогательного назначения); III зона (сооружения резервуарного хранения нефти, нефтепродуктов, конденсата общей приведенной вместимостью более 4000 м³ или единичной вместимостью резервуаров более 400 м³, сливноналивные эстакады); Ша зона (сооружения резервуарного хранения сырой и товарной нефти, нефтепродуктов, конденсата общей приведенной вместимостью от 1000 до 4000 м³ при единичной вместимости резервуаров не более 400 м³, резервуары (аварийные) ДНС общей вместимостью до 10 000 м³)⁷.

Опасность возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС) техногенного характера на исследуемых территориях обусловлена расположением потенциальных источников техногенных ЧС. Зона ЧС – территория или

⁶ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 25.09.2007 № 74 «О введении в действие новой редакции санитарно-эпидемиологических правил и нормативов СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов»».

⁷ Свод правил СП 231.1311500.2015 «Обустройство нефтяных и газовых месторождений. Требования пожарной безопасности», утв. Приказом МЧС России от 17.06.2015 г. № 302.

водная акватория, на которой в результате возникновения источника ЧС или распространения его последствий на другие районы возникла ЧС^{8,9}. Критериями отнесения природного процесса к категории ЧС является угроза для жизни или здоровья населения, значительный материальный ущерб для населения и/или хозяйствующих субъектов, ОС. Количественные показатели опасности основываются на данных многолетних наблюдений и могут выражаться, например, через значение повторяемости ЧС определённого вида за определённый промежуток времени. Уровень опасности для территорий того или иного вида ЧС природного характера подразделяется на несколько категорий. Например, Фалеев М. И., 2015 г., выделяет от 4 (очень высокая, высокая, средняя, низкая опасность) до 6 категорий (незначительно опасная, малоопасная, умеренно опасная, опасная, очень опасная, чрезвычайно опасная) в зависимости от повторяемости и вида ЧС [5]. Границы зон затопления и подтопления определяются исходя из повторяемости один раз в 100 лет¹⁰. Отдельно выделяются требования по зонированию территории радиоактивного загрязнения¹¹.

Зонирование вечной мерзлоты (многолетней криолитозоны) – это разделение территории на зоны, представленные разным характером распространения ММП. Основоположник зонирования вечной мерзлоты Сумгин М. И. (1937 г.) по характеру распространения разделил территорию вечной мерзлоты на три зоны: сплошную мерзлоту, мерзлоту с островами талых грунтов (прерывистая, спорадическая), островную – острова мерзлоты среди талых пород [6]. При этом внутри зон мощность ММП и температурные показатели также изменяются. Государственный фоновый мониторинг состояния многолетней мерзлоты осуществляется на базе государственной наблюдательной сети Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды¹².

⁸ Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».

⁹ Методические рекомендации по организации первоочередного жизнеобеспечения населения в чрезвычайных ситуациях и работы пунктов временного размещения пострадавшего населения, утв. МЧС России 20.08.2020 № 2-4-71-18-11.

¹⁰ Постановление Правительства РФ от 18.04.2014 № 360 «О зонах затопления, подтопления».

¹¹ СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009», утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2009 г. № 47.

¹² Постановление Правительства РФ от 25.06.2024 г. № 854 «Об утверждении Положения о государственном фоновом мониторинге состояния многолетней (вечной) мерзлоты».

В целях выявления наиболее уязвимых участков месторождения, подверженных опасным криогенным процессам, используется инженерно-геокриологическое районирование – составление карт, охватывающих инженерно-геокриологические условия (состав, температуру, физико-механические свойства грунтов, характер распространения ММП, гидрогеологические условия, подверженность опасным эндогенным и экзогенным процессам (в т.ч. термокарсту, термоэрозии, термоабразии, криогенному пучению, солифлюкции и др.)).

Показательным примером может служить уникальный проект Научного центра изучения Арктики «Мерзлотная карта ЯНАО». В проекте отражается текущий температурный режим мерзлоты и прогноз на 50 лет. Данные загружаются с 71 датчика, установленного по всей территории ЯНАО¹³. В рамках проекта по мониторингу состояния вечной мерзлоты и ее динамики под воздействием климатических изменений в Единой картографической системе Ямало-Ненецкого автономного округа в свободном доступе представлены результаты геокриологического картирования городов Салехард, Лабытнанги и Новый Уренгой^{14, 15}. Пример карты (фрагмент) для г. Новый Уренгой представлен на рисунке 1.

Оценка сейсмической опасности территории осуществляется с использованием сейсмического районирования. Это картирование сейсмической опасности, основанное на выявлении зон возникновения очагов землетрясений и определении сейсмического эффекта, создаваемого ими на земной поверхности¹⁶. По масштабу и уровню детализации различают: общее сейсмическое районирование (карты масштаба 1:5 000 000 – 1:2 500 000); детальное сейсмическое районирование (карты масштаба 1:500 000 – 1:100 000); сейсмомикрорайонирование (карты масштаба 1:50 000 и крупнее).

¹³ На Ямале создали динамическую мерзлотную карту региона 13 октября 2023 / ИА Красная Весна. URL: <https://rossaprimavera.ru/news/df36292d> (дата обращения: 18.12.2025).

¹⁴ Инженерно-геокриологическое районирование. URL: https://map.yanao.ru/eks/ing_geo_ray (дата обращения: 18.12.2025).

¹⁵ Мониторинг мерзлоты в ЯНАО: геокриологические карты городов стали общедоступными 18.09.2025. URL: <https://smotrim.ru/article/4693697> (дата обращения: 18.12.2025).

¹⁶ СП 14.13330.2018. Свод правил. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*, утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 24.05.2018 N 309/пр.

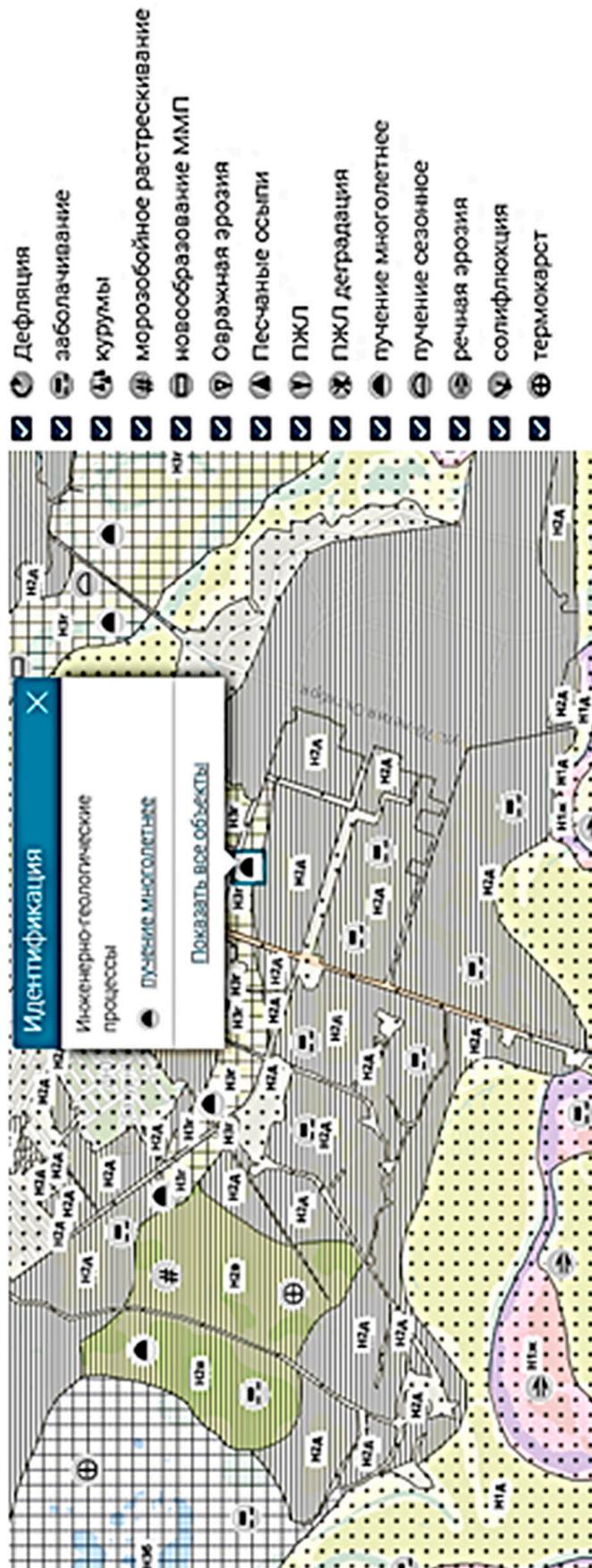


Рис. 1. Фрагмент карты инженерно-геологического районирования г. Новый Уренгой
Примечание: составлено по данным: Инженерно-геологическое районирование.

URL: https://map.yutao.ru/eks/ing_geo_gau (дата обращения: 18.12.2025);

Мониторинг мерзлоты в ЯНАО: геологические карты городов стали общедоступными 18.09.2025.

URL: <https://smotrim.ru/article/4693697> (дата обращения: 18.12.2025).

При длительной разработке месторождений углеводородов негативные геодинамические последствия проявляются в виде оседания территории, активизации деформационной активизация разломных зон, а также возникновения техногенной и техногенно индуцированной сейсмичности [7]. Для исследования потенциальных зон критических деформаций земной поверхности, которые могут оказывать разрушающее воздействие на инженерно-технические сооружения, традиционным является применение геодинамических полигонов. Выявление границ опасных зон деформации наземной поверхности осуществляется с помощью различных методов геодинамического мониторинга.

В зоне техногенного воздействия месторождений для целей проведения мониторинга, наряду с пунктами локального экологического мониторинга, организуются специально оборудованные опытные экологические полигоны. Расположение опытных полигонов должно обеспечить охват различных природно-климатических зон, что позволяет выявлять и исследовать региональные специфические особенности осуществления технологических процессов и природоохранных мероприятий исследуемых территорий¹⁷.

В России с 2021 года реализуется пилотный проект по созданию карбоновых полигонов – тестовых площадок разработки и испытания технологии измерения, мониторинга и контроля ПГ. Примером использования карбоновых полигонов, связанных с НГК, может быть карбоновый полигон «Мухрино» в Ханты-Мансийском автономном округе (разработка методики восстановления углеродного баланса нарушенных болотных экосистем в результате нефтедобычи) [8] и карбоновый полигон WayCarbon в Чеченской Республике (мониторинг потоков климатически активных газов природных и природно-техногенных экосистем, в т. ч. на рекультивированных загрязненных нефтепродуктами территориях) [9].

Уровень мониторинга геологической среды обуславливает использование соответствующих по масштабу наблюдательных полигонов (детальной, локальной, региональной или национальной наблюдательной сети). В зависимости от целей мониторинга создаются опытно-методические, изыскательские, фоновые, наблюдательные полигоны и т. п. Полигоны могут включать всю

рассматриваемую территорию или отдельную ее часть (опытные площадки, опорные участки, эталонные участки). Результаты геоэкологического мониторинга служат основой дифференцированного подхода к планированию и проведению превентивных мероприятий защиты ОС и инфраструктуры месторождений от разрушения.

Таким образом, зонирование территории месторождений нефти и газа по степени геоэкологической опасности (геоэкологическое зонирование) – это процесс дифференцирования территории месторождений, применяемый в целях обеспечения промышленной и экологической безопасности и направленный на выявление границ районов, обусловленных различными показателями проявлений ОПТП, характерных для определенного временного периода. В качестве способа повышения эффективности выявления зон опасных геоэкологических процессов на территории месторождений нефти и газа целесообразно системное исследование совместного воздействия опасных геоэкологических процессов, протекающих на единой территории. Для реализации данного подхода автором предлагается объединить рассмотренные выше полигоны под общим термином – «полигоны исследования опасных геоэкологических процессов» (геоэкологические полигоны). В указанном аспекте территория УНГКМ в данной статье рассматривается как ключевой район полигона комплексного исследования опасных геоэкологических процессов природного и техногенного происхождения. Выбор УНГКМ в качестве показательного был сделан автором по следующим причинам:

- расположение в Арктической зоне (повышенное влияние изменения климатических параметров (большая часть месторождения – за Полярным кругом), рис. 2а);
- значительные размеры (большая протяженность с севера на юг с изменяющимися природными условиями);
- эксплуатация в течении длительного периода;
- разработка одновременно 3 типов залежей (сеноманских, валанжинских и ачимовских) с различными геологическими условиями и периодами разработки (рис. 2 в, г);
- добыча одновременно нефти, газа и газового конденсата;
- расположение в зоне проявлений и активного изучения геодинамических процессов;
- расположение на территории проявлений и активного изучения ММП (рис. 2б)).

¹⁷ Руководящий документ РД 39-133-94 «Инструкция по охране окружающей среды при строительстве скважин на нефть и газ на суше», утв. Роскомнедр 28 декабря 1993 г., ГП «Роснефть» 4 января 1994 г.

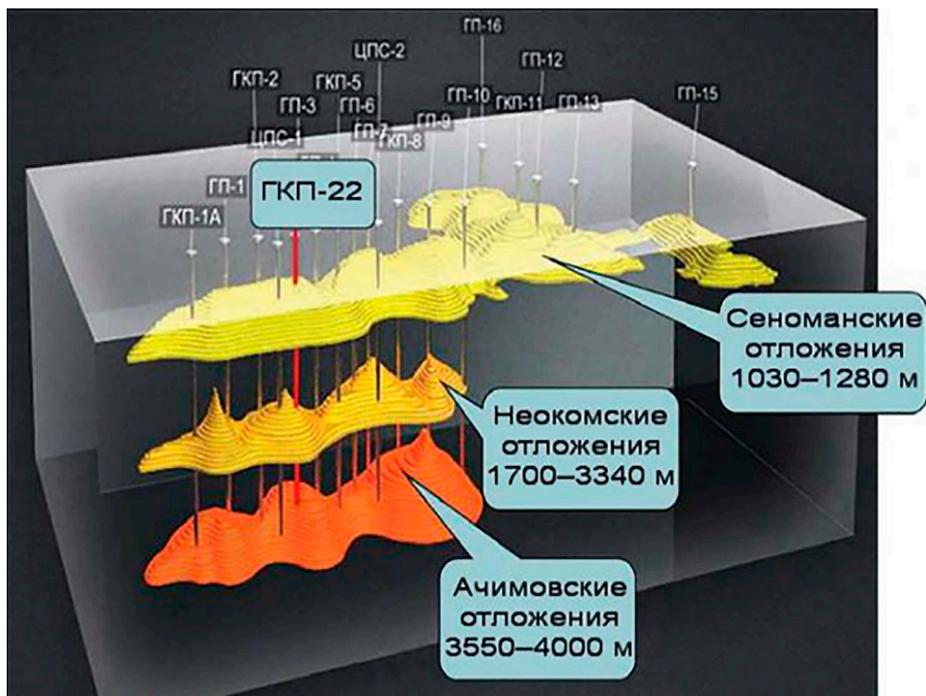


а) Расположение УНГКМ относительно Северного полярного круга [10]



б) Фрагмент карты точек наблюдения за состоянием вечной мерзлоты на территории России
Примечание: составлено по данным: Не упустить момент. Ученые призывают взять под контроль вечную мерзлоту 05.03.2022 URL: <https://ria.ru/20220305/merzlota-1775890813.html>
(дата обращения: 18.12.2025)

□ – зона исследований УНГКМ; 1 – скважины программы TSP с датчиками температуры на разных глубинах; 2 – площадки наблюдения за толщиной СТС (программа CALM); 3 – метеостанции Росгидромета, на которых осуществляют мониторинг температур грунта на глубине 3,2 метра. а – сплошная мерзлота; б – прерывистая; в – спорадическая; г – островная



в) Структурная схема нефтегазоносных залежей УНГКМ

Примечание: составлено по данным: Добыча природного газа. URL: <https://promzn.ru/gazovaya-promyshlennost/dobycha-prirodnogo-gaza.html> (дата обращения: 18.12.2025)



г) Схема зон нефтегазоносных залежей УНГКМ

Примечание: составлено по данным: Песцовая площадь Уренгойского НКМ. URL: https://neftegaz.ru/tech-library/mestorozhdeniya/142098-pestsovaya-ploshchad-urengoyskogo-gnkm/?clear_cache=Y&utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera (дата обращения: 18.12.2025)

Рис. 2 (а-г). Характеристика УНГКМ

Примечание: составлено автором с использованием [10]

УНГКМ находится на территории Пуровского и Надымского районов ЯНАО Тюменской области. ЯНАО расположен в пределах Западно-Сибирской платформы. С севера на юг протяженность составляет 220 км, при ширине от 30 до 60 км. Общая площадь составляет 6575,82 км². Большая часть находится за Полярным кругом. Суровость климата обусловлена незначительным притоком солнечной радиации, повышенной циклонической деятельностью, близостью холодного Карского моря.

Исследуемый район приурочен к Надым-Газовской синеклизе, осложненной структурами I-IV порядка. Наиболее крупная из них: стержневой Уренгойский мегавал, ограниченный крупными рифтогенными зонами. Основная доля запасов углеводородов сосредоточена вокруг крупных рифтовых систем. В геологическом строении принимают участие отложения юры, мела, палеогена и четвертичной системы, залегающие на палеозойском складчатом фундаменте.

Геологическая модель залежей включает 3 основных горизонта: сеноманские залежи (глубина залегания 1030–1280 м, начальное пластовое давление 12,1 МПа, температура 31°C); валанжинские залежи (глубина залегания 1700–3340 м, начальное пластовое давление – 17,2–66,7 МПа, температура 51–90°C); ачимовские залежи (глубина залегания 3550 – 4000 м, аномально высокое пластовое давление свыше 600 атм. и температура 105–115°C). На территории УНГКМ преобладающее распространение имеют монолитные ММП, двухслойное строение характерно для южной части площади.

Длительная добыча осуществляется на сеноманских и валанжинских залежах – 1966 и 1967 гг. разработки соответственно. Здесь повышен риск, связанный со старением оборудования, и наибольшее количество выведенных из эксплуатации объектов. Ачимовские залежи используются с 2008 г. Отличаются сложностью разработки, что является причиной повышенного технологического риска.

Зоны опасных геологических процессов выделяются автором посредством анализа результатов мониторинга УНГКМ и материалов ДЗЗ. Исследованию подверглись геодинамические, геокриологические процессы, загрязнение атмосферного воздуха, в том числе эмиссия ПГ, а также загрязнения нефтью и нефтепродуктами почвы и водоемов территории. Указан-

ный подход реализован в результате применения возможностей опытного образца цифровой платформы геологического мониторинга «АГИР-ТМ» и геопортала «Геоинфориск», разработанного на кафедре геологии РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина. Данная ГИС позволяет осуществить картографическое моделирование на основе идентификации источников опасных геологических процессов [11]. В состав опытного образца входят модули: Raster Map, Vector Map, 3-D Map, Photo, Object Edit, Store House, Math, обеспечивающие построение моделей территории и объектно ориентированных моделей геологического мониторинга. Геопортал предоставил возможность отображения геопространственной Базы данных в виде моделей УНГКМ на различных подложках [11]. Пространственная информация рассматривается в виде логической многослойной модели картографической системы, содержащей слои по каждому выделяемому компоненту. Слои могут накладываться один на другой. Каждый слой имеет самостоятельное значение и может быть выведен на экран отдельной аналитической картой. Дополнительные пояснения по каждой отметке содержатся в атрибутивных полях, соответствующих специфике информации.

Итоги геологического мониторинга исследуемой территории детально рассмотрены ранее в соавторстве в публикациях [12–14]. При этом результаты геодинамических исследований, полученные дистанционными методами, показали хорошую корреляцию с результатами, полученными традиционными методами мониторинга [11; 14]. Рассмотрены возможности применения дистанционных исследований эмиссии ПГ, подчеркнута необходимость дополнительного исследования вклада потенциальной эмиссии ПГ от ликвидированных скважин [11].

В материалах указанных выше исследований приведены выводы о связи уровней проседания горных пород и объемов добычи углеводородов на УНГКМ. Однако в причинах проседания территории значительную долю могут иметь изменения геокриологических параметров грунтов. Повышение температурных параметров приземного слоя атмосферы, воздействуя на температурные показатели горных пород, может вызвать изменение параметров залегания многолетних мерзлых пород (ММП).

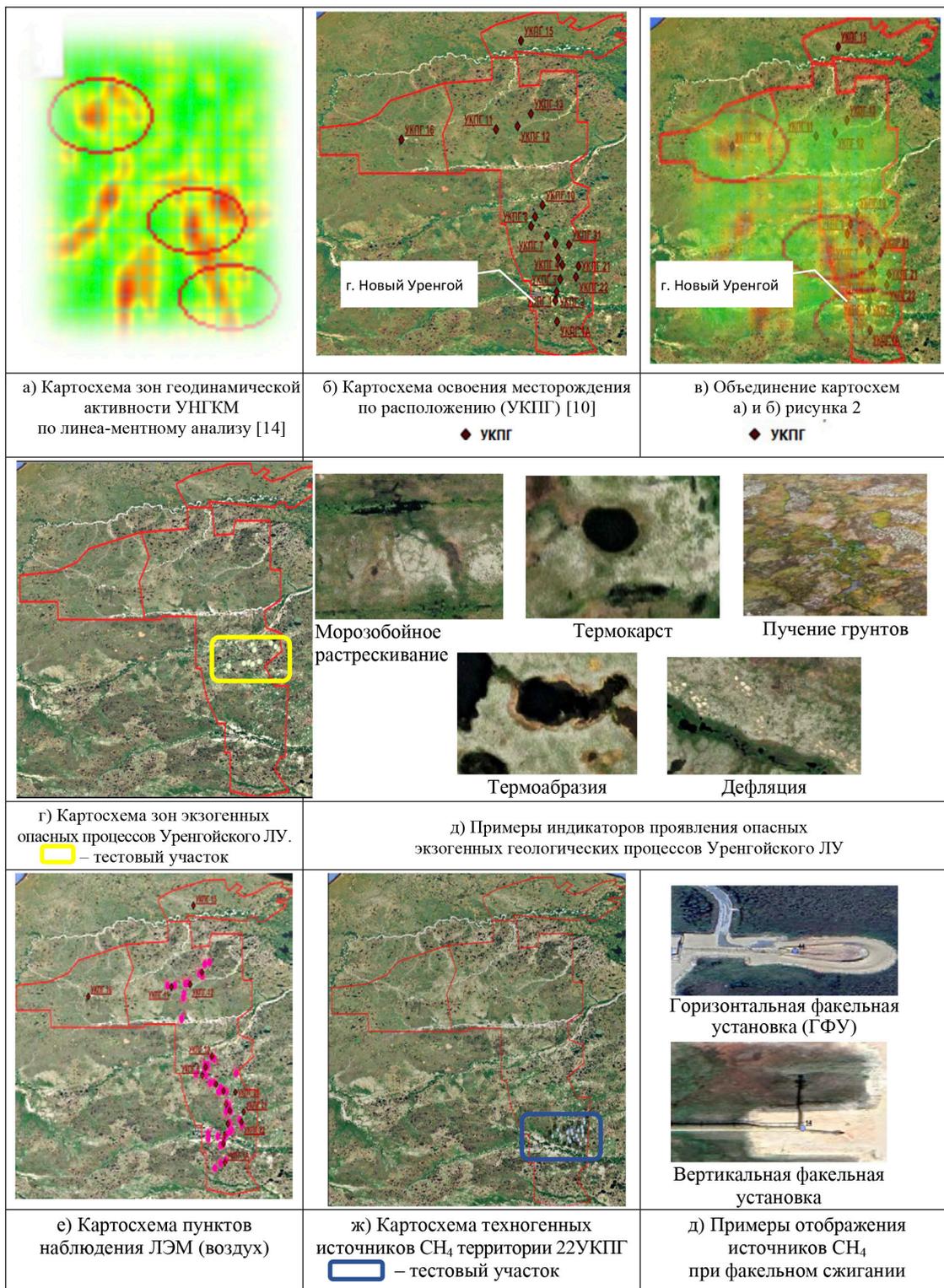


Рис. 3. Примеры зонирования опасных геоэкологических процессов УНГКМ [10; 14]

В соответствии с этим дальнейшее исследование процессов геодинамических подвижек территории предусматривает детальное изучение вклада геоэкологиче-

ских опасных процессов, в том числе изучение влияния на ММП изменения температуры приземного слоя атмосферы, вызванного эмиссией ПГ природного и техногенного

происхождения. Понимание роли концентрации ПГ в атмосфере имеет большое значение в свете предпринимаемых в мире попыток замедления потепления климата [15].

В качестве примера выделения зон опасных геозекологических процессов представлены зоны геодинамической активности, выделенные на основании проведенного линементного анализа с использованием возможностей геопортала «Геоинфориск» [14] (рис. 3 а, в).

Тестовым участком для зонирования проявления опасных экзогенных процессов выбрана территория разработки ачимовских отложений УНГКМ (рис. 3г). На данном участке по результатам полевых исследований (2021-2023 гг.) в рамках подготовки документации обустройства ачимовского участка УНГКМ выявлены опасные экзогенные геологические процессы следующих основных категорий: термокарст, термоэрозия, термоабразия, пучение грунтов, морозобойное растрескивание. На основании данной информации, дополненной материалами из открытых источников, сформирован каталог эталонных изображений для дешифрирования (примеры индикаторов приведены на рис. 3д).

Техногенная эмиссия ПГ рассмотрена на примере метана (рис. 3 е – д). Результаты прямых измерений, полученные на основании обнаружения присутствия ПГ в атмосферном воздухе, приняты по материалам локального экологического мониторинга (ЛЭМ) за 2019-2023 гг. ЛУ ООО «Газпром добыча Уренгой». Расположение пунктов наблюдения ЛЭМ представлено на рис. 3е. Отображение результатов мониторинга на каждом пункте обеспечивается при выводе атрибутивной информации конкретного пункта. Для верификации результатов проведена апробация подхода, основанного на использовании материалов искусственного спутника Земли Sentinel-5P (TROPOMI) (ЕКА), в рамках геопортала «Геоинфориск» [14]. Тестовым участком выбрана территория 22УКПГ.

Применение дешифрирования и ландшафтной индикации существенно сокращает сроки полевых исследований, позволяет сконцентрировать трудоемкие буровые и другие виды работ на типичных участках. ГИС в форме геопорталов имеют возможности консолидации результатов выделения, закрепления и визуализации всех рассмотренных выше зон, районов, участков и полигонов с необходимыми характеристиками и результатами исследований, в едином гео-

информационном пространстве. Предусмотрена возможность анализа данных путем наложения слоев, соответствующих выбранным задачам.

Данная статья призвана подчеркнуть важность одновременного учета в процессе геозекологического мониторинга комплекса опасных геозекологических процессов, происходящих на выделяемой территории, и их совместного влияния. Комплексирование в единой ГИС результатов геозекологического зонирования позволяет, рассматривая в приближении интересующий участок, получить обобщенные данные о состоянии ОПТП и выполнить планирование на основании моделирования и прогноза развития ситуации.

Представленный подход дает возможность осуществлять мониторинг опасных геологических, геокриологических процессов, загрязнения ОС, планировать профилактические и защитные мероприятия, оперативно реагировать на изменения и аварии, предотвращать возникновение ЧС и может быть использован на других месторождениях.

Заключение

Комплекс опасных геозекологических процессов, происходящих на территориях месторождений нефти и газа, обуславливает необходимость дифференцирования территории по уровню их опасности. Геозекологическое зонирование является важной частью процессов геозекологического мониторинга месторождений углеводородов. Функционал современных ГИС позволяет дифференцировать территории не только исходя из результатов оценочных исследований, но проводить прогнозное зонирование на основании моделирования развития опасных геозекологических процессов. Развитие работ по геозекологическому зонированию имеет важное значение для обеспечения промышленной и экологической безопасности объектов НГК.

В аспекте климатических изменений, в связи с непосредственным взаимным влиянием, целесообразным является включение компонентов приземного слоя атмосферы в состав компонентов геологической среды и дальнейшее изучение закономерностей влияния температуры приземного слоя атмосферы на состояние ММП в задачах геозекологического мониторинга. Повысить его эффективность позволит применение полигонов комплексного исследования опасных геозекологических процессов (геозекологических полигонов).

Для выделения зон опасных геоэкологических процессов необходимо применение системы, объединяющей комплексные исследования опасных природных и техногенных процессов, возможности методов ДЗЗ и функционал специализированных геоинформационных систем. Применение данного подхода позволяет увеличить эффективность геоэкологического мониторинга с учетом повышения охвата исследуемой территории, сокращения временных затрат, возможностей моделирования развития опасных геоэкологических процессов, оперативности реагирования на ЧС, что особенно важно при условии значительной территориальной разобщенности объектов мониторинга, труднодоступности отдельных районов и кратковременности полевого периода территории месторождений углеводородов Арктической зоны.

Список литературы

1. Абросимов Н. В., Акимов В. А., Ахметханов Р. С., Боговявленский В. И., Бородин В. В., Велихов Е. П., Вершинин С. А., Власов С. В., Гаденин М. М., Гинзбург А. А., Гражданкин А. И., Греков С. В., Дмитриевский А. Н., Дроздов Ю. Н., Дубинин Е. Ф., Жулина С. А., Ибрагимов И. Э., Ивченко Б. П., Илюшкин А. П., Исаев Л. К., Калашник А. И., Качанов С. А., Кононов С. А., Корниенко О. А., Кравченко В. А., Кузьмин Ю. О., Кузнецов В. П., Лаверов Н. П., Лавковский С. А., Лебедев А. В., Лещенко В. В., Лисин Ю. В., Мандель А. Я., Мансуров М. Н., Махутов Н. А., Мельников Н. Н., Мирзоев Д. А., Надин В. А., Некипелов А. Д., Никонов А. И., Осипов В. И., Петров В. П., Печеркин А. С., Пучков В. А., Радионова С. Г., Резников Д. О., Сидоров В. И., Соломатин С. В., Сосновский Л. А., Таранов А. А., Телегина Е. А., Токарев Н. П., Толстов С. С., Трусков П. А., Фалеев М. И., Федота В. И., Черноплеков А. Н., Шульц В. Л., Юдина О. Н. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. М.: МГОФ «Знание», 2013. 640 с. ISBN 978-5-87633-115-1. EDN YLXIQZ.
2. Куликова Е. Ю. Цели, задачи и структура геоэкологического мониторинга при освоении подземного пространства // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 7. С. 152-157. EDN RGRPCR.
3. Сергеев Е. М. Инженерная геология – наука о геологической среде // Инженерная геология. 1979. № 1. С. 3-19.
4. Аковецкий В. Г., Лавренчук В. А. Геоэкологические риски реализации проектов нефтегазового комплекса в Арктической зоне // Целостность и ресурс в экстремальных условиях: сборник материалов и докладов Всероссийской конференции, приуроченной к 75-летию ЯНЦ СО РАН, Якутск, 19–23 сентября 2024 года. Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2024. С. 17-24. DOI 10.24412/ci-37269-2024-1-17-24. EDN BCRURT.
5. Фалеев М. И., Малышев В. П., Быков А. А., Кондратьев-Фирсов В. М. Методологические подходы к зонированию территорий Российской Федерации по уровням риска чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2015. Т. 5, № 1(8). С. 67-90. EDN TLPTUZ.
6. Сумгин М. И. Вечная мерзлота почвы в пределах СССР. 2-е изд. доп. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1937. 432 с.
7. Кузьмин Ю. О. Парадоксы аномальных оседаний на длительно разрабатываемых месторождениях нефти и газа // Геофизические процессы и биосфера. 2025. Т. 24, № 2. С. 30–41. DOI: 10.21455/GPB2025.2-3. EDN HWZYDZ.
8. Булатов В. И., Игенбаева Н. О., Куприянова Ю. В. Западно-Сибирский болотно-таёжный центр Мухрино: от учебно-полевого стационара до карбонового полигона // Теоретические и прикладные проблемы ландшафтной географии. VII Мильковские чтения: материалы XIV Международной ландшафтной конференции. В 2-х томах, Воронеж, 17–21 мая 2023 года / Отв. редакторы А. С. Горбунов, А. В. Хорошев, О. П. Быковская. Том 2. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2023. С. 190-193. DOI: 10.17308/978-5-9273-3693-7-2023-190-193. EDN KGEGBJ.
9. Керимов И. А., Эльжаев А. С., Додуев А. А. Геофизические исследования на карбоновом полигоне Чеченской Республики // Геология и геофизика Юга России. 2023. Т. 13, № 3. С. 49-62. DOI: 10.46698/VNC.2023.42.75.004. EDN AFJCUJ.
10. Обустройство Песцового месторождения. Куст газовых скважин №16А-1 Предварительная оценка воздействия на окружающую среду ЕПФ2-КГС16А1-ПОВОС. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1770627914&tld=ru&lang=ru&name=predvaritelnaya-otsenka-epf2-kg-s16a1-povos.pdf> (дата обращения: 18.12.2025).
11. Аковецкий В. Г., Афанасьев А. В., Лавренчук В. А. Геоэкологические риски и промышленная безопасность нефтегазового комплекса: геоинформационные аспекты // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2024. № 5(320). С. 45-54. EDN NYXRLP. URL: <https://journal.gubkin.ru/journals/protection/2024/5-320/45-54/> (дата обращения: 18.12.2025).
12. Аковецкий В. Г., Лавренчук В. А. Особенности обеспечения экологической безопасности территории ликвидации скважин добычи нефти и газа // Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России: сборник трудов XVIII Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 24 апреля 2025 года. М.: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И. М. Губкина, 2025. С. 12-18. EDN ECQYEM.
13. Аковецкий В. Г., Афанасьев А. В., Лавренчук В. А. Геоинформационный мониторинг в задачах оценки геоэкологических рисков объектов нефтегазового комплекса // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2025. № 2(323). С. 85-95. EDN SHSQBX. URL: <https://journal.gubkin.ru/journals/protection/2025/2-323/85-95/> (дата обращения: 18.12.2025).
14. Аковецкий В. Г., Афанасьев А. В., Лавренчук В. А., Рамирес Суарес Х.А. Геоинформационные аспекты в задачах геоэкологического мониторинга месторождений нефти и газа // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И. М. Губкина. 2025. № 4(321). С. 63-78. EDN ITYSKL. URL: <https://journal.gubkin.ru/journals/proceedings/2025/4-321/63-78/> (дата обращения: 18.12.2025).
15. Боговявленский В. И., Боговявленский И. В., Кишанков А. В., Корниенко С.Г., Никонов Р. А., Сизов О. С. Повышение эффективности и экологической безопасности освоения нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли в условиях меняющегося климата // Актуальные проблемы нефти и газа. 2023. № 3(42). С. 235-263. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2023-42.art15. EDN WTQTYR. URL: https://oilgasjournal.ru/issue_42/bogoyavlensky.pdf (дата обращения: 18.12.2025).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.



РАЗРАБОТКА НОВОГО ПОДХОДА К ВЫЯВЛЕНИЮ НЕГАТИВНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ СРЕДЫ С УЧЕТОМ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ДАННЫХ О ТРАНЗИТНЫХ ТАЛЬВЕГАХ И РОТАЦИИ ЗЕМЛИ

Соколова Н. В. ORCID ID 0000-0002-4381-4667

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт проблем нефти и газа Российской академии наук»,
Москва, Российская Федерация, e-mail: sona@ipng.ru*

Статья посвящена актуальной, но недостаточно изученной проблеме, от решения которой зависит создание эффективных геотехнологий, адаптированных к современным изменениям геологической среды. Целью исследования является разработка нового подхода к выявлению негативных геодинамических факторов среды с учетом интегрированных данных о транзитных тальвегах и ротации Земли. Транзитные тальвеги можно рассматривать как индикаторы господствующего процесса уплотнения вещества к центру Земли. С их помощью определялись пределы действия склонов – наклонных участков земной поверхности, на которых размещаются природно-техногенные объекты, в том числе аварийные. С учетом фактических данных об изменениях скорости вращения Земли и принципов определения транзитных тальвегов были впервые выявлены достаточно четкие пространственно-временные структуры, которые дают представления о неровностях земной орбиты. Эти пространственно-временные структуры отражают особенности замедления и ускорения вращения планеты, а также моменты их неблагоприятных проявлений в точках перехода. В такие моменты фиксируется либо минимальное замедление, либо максимальное ускорение. Показана их связь с развитием аварий. Рассмотрено совокупное влияние изменений склонов, склоновых процессов и непрерывного вращения планеты на развитие в 2010 г. аварийной ситуации на нефтедобывающей платформе Deepwater Horizon в Мексиканском заливе. Результаты исследования могут быть использованы при разработке экологически чистых нефтегазовых технологий с учетом негативных (для природно-техногенных объектов) изменений склонов при возможных конкретных ситуациях, связанных с вращением Земли вокруг своей оси и с формированием неровностей ее орбитального пути.

Ключевые слова: современный геодинамический фактор, транзитный тальвег, склон, скорость вращения Земли, ускорение вращения, замедление вращения, пространственно-временные структуры, орбита Земли

DEVELOPMENT OF A NEW APPROACH TO IDENTIFYING NEGATIVE GEODYNAMIC ENVIRONMENTAL FACTORS TAKING INTO ACCOUNT INTEGRATED DATA ON TRANSIT THALWEGS AND EARTH ROTATION

Sokolova N. V. ORCID ID 0000-0002-4381-4667

*Federal State Budgetary Scientific Institution
“Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences”,
Moscow, Russian Federation, e-mail: sona@ipng.ru*

The article under consideration is devoted to a relevant, but insufficiently studied problem, the solution to which determines the creation of effective geotechnologies adapted to modern changes in the geological environment. The aim of the study is to develop a new approach to identifying negative geodynamic environmental factors taking into account integrated data on transit thalwegs and the Earth's rotation. Transit thalwegs can be considered as indicators of the prevailing process of increasing compaction of matter towards the Earth center. With their help, the limits of the slopes action were determined – inclined sections of the earth's surface on which natural and man-made objects, including emergency ones, are located. Based on actual data on changes in the Earth's rotation rate and the principles for determining transit thalwegs, fairly clear spatiotemporal structures were identified for the first time, providing insight into the irregularities of Earth's orbit. These spatiotemporal structures reflect the deceleration and acceleration characteristics of the planet's rotation, as well as the moments of their unfavorable manifestations at transition points. At such moments, either minimal deceleration or maximum acceleration is recorded. Their connection with the development of accidents is demonstrated. The combined influence of slope changes, slope processes, and the Earth's continuous rotation on the development of the 2010 emergency at the Deepwater Horizon oil platform in the Mexico Gulf is examined. The study's results can be used in the development of environmentally friendly oil and gas technologies, taking into account the negative effects (for natural and man-made objects) of slopes changes in possible specific situations related to the Earth's rotation around its axis and the irregularities formation in the Earth's orbital path.

Keywords: modern geodynamic factors, transit thalweg, slope, Earth's rotation velocity, rotation acceleration, rotation deceleration, spatiotemporal structures, Earth's orbit

Введение

Проблема формирования условий активизации современных негативных для социума внешних и внутренних геодинамических процессов является очень актуальной, так как от нее зависит разработка эффективных экологически чистых геотехнологий предупреждения аварийных ситуаций на природно-техногенных объектах различной степени опасности. В настоящее время по данной теме проведено много исследований высокого уровня, которые, однако, сложно, а порой и невозможно использовать при разработке отмеченных геотехнологий [1]. Фиксируется также слабая изученность этой сложнейшей комплексной проблемы с учетом непрерывной динамики вещества земной поверхности и глубоких горизонтов в условиях ротации Земли [2].

При корректной формализации геоданных возникает необходимость минимизации допущений, приведенных и проанализированных в [3]. Там же [3, с. 50] приводится, в частности, и неверное допущение о том, что значения высот рельефа в различных точках земной поверхности функционально не связаны между собой. Такое допущение заложено в методике создания цифровых моделей рельефа. Поэтому эти модели целесообразно модернизировать, чтобы применять их далее для проведения геофизических исследований и изучения напряженно-го состояния недр.

При создании новой базовой геоосновы для цифровых моделей рельефа с учетом современных негативных изменений геологической среды необходимо использовать фактические данные, отражающие непрерывные геодинамические процессы крупного ранга, в том числе господствующее усиление уплотнения вещества к центру Земли. В настоящее время значимость этого процесса недооценивается, хотя совершенно очевидно, что при его ослаблении усилится антипод – процесс разуплотнения вещества к центру Земли, который способен разрушить планету.

Индикаторами господствующего усиления уплотнения вещества к центру Земли являются тальвеги, точнее транзитные тальвеги, обладающие свойством непрерывности [4; 5]. Однако в мире пока тальвеги используются только фрагментарно, не как системные геологические объекты. Отдельные фрагменты тальвегов представлены относительно широко в зарубежной практике для решения конкретных задач, например, модернизации уже существующих цифро-

вых моделей рельефа [6; 7], исследования склоновых процессов [8]. Тем не менее такой фрагментарный подход не позволяет учесть уровни естественного управления процессами денудации и ротационный фактор, что необходимо при совершенствовании геоосновы (фундамента) для технологий недропользования.

В единой системе транзитных тальвегов каждая точка земной поверхности выполняет свои функции. Относительно самые низкие точки являются местными базами денудации (МБД) разного ранга. МБД в узлах транзитных тальвегов отражают взаимодействие встречных гидро- и литодинамических потоков. В таком узле зафиксирован первый уровень естественного управления процессами денудации, при котором роли соединяющихся транзитного потока и его активного притока четко определены. Другие точки выполняют функцию слабых звеньев, связующих МБД между собой, в них реализуются взаимодействия противоположных потоков (имеющих разные МБД) через местный водораздел. Таким образом, транзитные тальвеги структурированы не только узлами, но и воронками, каждая из которых является сферой влияния конкретного узла гидро- и литодинамических потоков.

В настоящее время также недооценивается ротационный фактор в геологии [9]. Хотя, по мнению А. Ю. Ретеюма [10, с. 169], обнаружение импульсов, исходящих из маховика планеты, который при резком изменении скорости своего вращения приводит в движение механизм Эль-Ниньо и Ла-Нинья, открывает перспективы предвидения. Главная трудность состоит в отсутствии надежной информации о факторах, контролирующей продолжительность суток. Согласно [11], график изменения скорости вращения Земли напоминает плавные волны. Одновременно известно, что путь Земли вокруг Солнца неровный, и это отражается на скорости ее вращения вокруг своей оси. При замедлении вращения Земли усиливаются негативные процессы на земной поверхности, в том числе сейсмичность [12; 13].

Цель исследования – разработка нового подхода к выявлению негативных геодинамических факторов среды с учетом интегрированных данных о транзитных тальвегах и ротации Земли.

Материалы и методы исследования

Для показа нового подхода к выявлению негативных геодинамических факторов среды с учетом интегрированных

данных о транзитных тальвегах и ротации Земли был выбран участок земной поверхности с нефтедобывающей платформой в Мексиканском заливе, где в 2010 г. произошла авария [14; 15].

Транзитные тальвеги на земной поверхности определялись с использованием общегеографических карт разного масштаба, а также батиметрических данных [16; 17]. В методическом плане при необходимости поэтапной детализации характера расчленения наклонных участков земной поверхности, где размещены природно-техногенные объекты, целесообразно также применять топографические карты крупного масштаба и материалы дистанционного зондирования Земли. При дешифрировании по аэро- и космическим фотоматериалам склоновых процессов усиления сноса необходимо применять методику, приведенную в работе [18, с. 177–245].

Для учета ротационного фактора использовалась глобальная система гидро- и литодинамических потоков, действующая на земной поверхности и состоящая из мощнейшего течения Западных Ветров (ТЗВ) с запада на восток и двух его активных противоположных притоков (атлантического и тихоокеанского). Данная система, выявленная с помощью транзитных тальвегов самого крупного ранга, помогла определить два режима вращения Земли вокруг своей оси (усиление тихоокеанского притока ТЗВ и ослабление атлантического и, наоборот, усиление атлантического и ослабление тихоокеанского притока ТЗВ). Такие режимы сменяют друг друга через каждые 12 ч. Более подробно это изложено в работе [4].

С использованием транзитных тальвегов разного ранга выделяются три вида взаимосвязанных геодинамических структур естественного управления процессами денудации разного ранга:

1. Положительные области сноса [5].
2. Отрицательные области (депрессии) – сферы узлов транзитных тальвегов [19].
3. Склоны с двумя координатами наклона в ортогональных плоскостях [20].

В методическом плане в зависимости от решаемой практической задачи целесообразно применять сочетания данных структур при ведущей роли одной из них. При разработке, например, геотехнологии недопущения обмеления рек и усиления сейсмичности в качестве ведущих структур целесообразно использовать сферы узлов транзитных тальвегов, при создании геотехнологии предотвращения расчленения участка

земной поверхности и борьбы с усилением эрозионных процессов – склоны, хотя при этом могут учитываться и оставшиеся два вида структур относительно низкого ранга.

Для выявления степени потенциальной опасности разрушения рассматриваемого склона (наклонного в двух ортогональных направлениях участка земной поверхности), на котором размещалась до аварии нефтедобывающая платформа, прежде всего нужно знать его пределы и характер естественного развития. Согласно [20], нижней его границей является транзитный тальвег, верхней – линия водораздела, связанная с отмеченной зоной транзитного тальвега, боковые границы склона отражают пределы взаимодействия двух ортогональных составляющих наклона, одна из которых в зоне транзитного тальвега показывает характер естественного управления как самим склоном, так и эрозионными процессами на нем.

По вновь разработанным соответствующим регламентам с использованием общегеографических и батиметрических (при необходимости) карт крупного масштаба, а также аэрофотоматериалов можно будет определить достаточно точные количественные характеристики границ каждого такого склона на земной поверхности, а также процессов его дренирования и расчленения. Склоны, функционирующие на разных глубоких горизонтах, выявляющиеся с помощью структурных геологических карт, в свою очередь, могут позволить в перспективе получить новые данные о закономерностях современных изменений геологической среды, влияющих на степень безопасности природно-техногенных объектов.

Из трех видов геодинамических структур склоны являются более мобильными. Поэтому необходим их мониторинг. Наиболее опасный режим развития склона – растяжение его в плоскости управляющего транзитного тальвега, расчленение и разрушение. Этот негативный процесс реализуется при определенном режиме ротации Земли.

Так как по факту ТЗВ совпадает по направлению с вращением Земли вокруг своей оси и движением ее по орбите, то при решении поставленной проблемы необходимо рассматривать влияние отмеченных ротационных процессов на развитие выделенного склона. Замедление вращения планеты приводит в определенное время к замедлению и ослаблению ТЗВ. При этом возрастает роль взаимодействия двух про-

тивоборствующих его активных притоков, что не способствует сохранению относительной устойчивости планеты и безопасному развитию склонов. Необходимо учитывать, что, согласно [16], атлантический приток всегда активнее тихоокеанского по латерали, но по вертикали последний сильнее, так как в нем задействован самый глубокий МБД на земной поверхности в Марианской впадине.

Результаты исследования и их обсуждение

20 апреля 2010 г. в 22 ч по местному времени произошел взрыв на нефтедобывающей платформе Deerwater Horizon, расположенной в 80 км от побережья штата Луизиана (США) в Мексиканском заливе, в условиях замедления вращения Земли [14; 15; 21]. На рис. 1 показан склон, в пределах которого функционировала эта аварийная нефтедобывающая платформа. Границами склона являются управляющий транзитный тальвег (синяя линия) и пределы действия (красная линия) приточной системы в зону данного тальвега. Управляющий транзитный тальвег является продолжением подобного, в котором развивается река Миссисипи. На рис. 1 отмечен узел 1 транзитных тальвегов относительно крупного ранга, функционирующих на дне Мексиканского залива. Согласно [17], отмеченный подводный склон сильно эродирован в субмеридиональном направлении. Он имеет две координаты наклона, одна из них (синяя стрелка) управляющая, от которой зависит интенсивность проявления денудационных процессов. Вторая (красная стрелка) – выражена слабо. Фиксируется очень большой уклон управляющего тальвега, намного превышающий подобный показатель самого склона.

Исследуемый склон (рис. 1) расчленен по факту [17] таким образом, что приточная система в зону управляющего транзитного тальвега выражена слабо, при этом также фиксируются достаточно протяженные участки притоков, параллельные зоне управляющего транзитного тальвега (синяя линия). Такой характер расчленения может быть реализован при растяжении склона в субширотном простирании. Если бы рассматриваемый склон развивался в условиях растяжения в субмеридиональном простирании, то приточная система была бы ориентирована преимущественно ортогонально сильно расчлененной зоне управляющего транзитного тальвега.

Склоновые процессы усиливаются или ослабевают в зависимости от режима вращения Земли и особенностей движения ее по орбите. Кроме того, характеристики сопряженных склонов на различных горизонтах могут сильно отличаться и по-разному действовать на соседние участки природно-техногенного объекта, что способствует его деформациям и созданию аварийной ситуации.

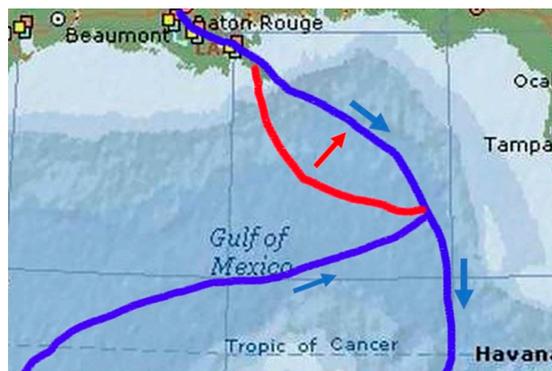


Рис. 1. Подводный склон в Мексиканском заливе (оконтуренный синей (транзитный тальвег) и красной (предел действия склона) линиями, с двумя ортогональными координатами наклона, показанными синей и красной стрелками), где 20 апреля 2010 г. произошла авария
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования с использованием источников [14; 15; 17]

Согласно [13], геодинамическую нестабильность могут вызвать пульсации, многократные колебания объема Земли, которые, в свою очередь, являются причинами периодического возрастания деформаций сжатия и растяжения самой земной коры и отдельных подвижных ее зон.

Непрерывное вращение Земли вокруг своей наклоненной к плоскости эклиптики оси влияет на развитие господствующего процесса усиления уплотнения вещества к центру Земли. Моделирование показывает, что при таком вращении Земли всякий склон попадает в кардинально разные условия развития через каждые 12 ч (растяжения или сжатия зон транзитных тальвегов субмеридионального простирания).

Рассматриваемая авария случилась при первом режиме ротации Земли, когда усиливался тихоокеанский приток ТЗВ. При таком режиме отмеченный на рис. 1 склон развивается с 12 ч дня до 12 ч ночи в условиях растяжения, раскрытия зон транзитных тальвегов субмеридионального простирания, что

не способствовало устойчивости расположенной на данном склоне нефтедобывающей платформы. Было бы целесообразно рассмотреть в будущем и динамику сопряженных наклонных участков на разных глубоких горизонтах, задействованных при обустройстве данного техногенного объекта.

По факту [16] нестабильным зонам транзитных тальвегов, структурированным воронками и имеющим четкие пределы своего действия, свойственны экстремальные значения погружения.

Для получения дополнительных знаний об орбитальном пути Земли была проведена систематизация экстремальных изменений скорости вращения Земли, отраженных в [21]. Ускорение и замедление вращения Земли в [21] рассматриваются относительно общепринятой продолжительности суток. К сожалению, пока нет информации об изменениях скорости вращения Земли в течение суток, чтобы проследить более детально взаимосвязи двух противоположных режимов ее вращения вокруг своей оси.

При систематизации отмеченных выше данных в рамках проведенных исследований впервые учитывались темп и ранг противо-

положных процессов ускорения и замедления. В результате в разные годы достаточно четко были выделены периоды продолжительностью 11–17 суток, включающие два максимума и один минимум замедления на фоне общего замедления (табл. 1) или два минимума и один максимум ускорения на фоне общего ускорения (табл. 2, № 6). Фиксируются также переходные периоды, когда внутри них происходит смена противоположных процессов, замедление сменяется ускорением, и наоборот. Такие периоды обязательно включают относительный максимум ускорения (табл. 2, № 1–5).

Следует отметить, что каждый выделенный период показывает не только временной интервал, но и соответствующий ему отрезок (депрессию) пройденного орбитального пути. Известно, что за сутки Земля проходит по орбите почти 2,6 млн км.

Такие внешние по отношению к Земле пространственно-временные структуры – депрессии по положению могут быть прямыми (по ходу движения) и обратными (барьеры). Это показывает разность экстремальных граничных значений изменения вращения планеты.

Таблица 1

Периоды изменения темпа замедления вращения Земли, в том числе включающие даты аварий на нефтедобывающей платформе в Мексиканском заливе (20 апреля 2010 г.), на АЭС в Чернобыле (26 апреля 1986 г.) и Фукусиме (11 марта 2011 г.)

№ п/п	Продолжительность периода изменений темпа замедления вращения Земли при движении по орбите (включающего относительный минимум замедления), сут.	Моменты с экстремальными показателями изменений скоростей вращения Земли на фоне общего ее замедления			Пространственно-временная структура с учетом ее наклона (прямая или обратная)
		Относительного максимума замедления	Относительного минимума замедления (ОЗН)	Относительного максимума замедления	
1	16	18.04.1985	26.04.1985	03.05.1985	Обратная
2	13	23.04.1986	29.04.1986	05.05.1986	Прямая
3	17	25.04.1987	03.05.1987	11.05.1987	Прямая
4	16	14.04.1988	22.04.1988	29.04.1988	Прямая
5	15	08.04.2009	14.04.2009	22.04.2009	Обратная
6	13	13.04.2010	19.04.2010	25.04.2010	Обратная
7	14	16.04.2011	22.04.2011	29.04.2011	Прямая
8	17	17.04.2012	25.04.2012	03.05.2012	Обратная
9	17	01.03.2010	08.03.2010	17.03.2010	Прямая
10	14	06.03.2011	13.03.2011	19.03.2011	Обратная
11	11	10.03.2012	14.03.2012	20.03.2012	Обратная

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования с использованием источника [21].

В рассматриваемых структурах фиксируются две части одного ранга. В одной из них по ходу движения Земли по орбите, например, на фоне общего замедления темп его уменьшается, а в другой – увеличивается. На фоне общего ускорения выделяются отрезки времени, когда темп ускорения сначала увеличивается, а затем уменьшается. Эти две части разделены переходом, своеобразной орбитальной зоной напряжений (ОЗН), где реализуется прямой контакт противоположных процессов уменьшения и увеличения замедления (или, соответственно, увеличения и уменьшения ускорения). В такой зоне фиксируется или минимум замедления, или максимум ускорения вращения Земли.

По своей сути ОЗН является геодинамическим стресс-фактором, сила его напрямую зависит от разности количественных параметров усиления ускорения в ОЗН и последующего увеличения замедления, а также от ранга депрессии на орбите. Эта проблема требует дополнительных изысканий.

Выделенные с учетом [21] периоды прохождения Землей соответствующих депрессий на своем пути доказывают, что орбита планеты не является ровной. Она и не замкнутая, а представляет собой взаимосвязанные спиральные витки, которые могут изменяться (продолжительность года уменьшается или увеличивается в определенных пределах).

Определены границы (относительные максимумы замедления) орбитальных депрессий в 2009–2012 гг., включающих 20 апреля, в том числе дату аварии на нефте-

добывающей платформе в Мексиканском заливе (табл. 1, № 5–8).

Обращает на себя внимание то, что внутри выделенных периодов подобные более низкого ранга не просматриваются. Поэтому можно на начальном этапе исследований считать их первичными, способными к закономерному изменению во времени и в пространстве. Продолжительность данных периодов с 20 апреля изменяется от 15 (2009 г.), 13 (2010 г.), 14 (2011), до 17 (2012 г.) суток (табл.1, № 5–8).

В такой системе периодов авария в Мексиканском заливе 20 апреля 2010 г. произошла сразу после прохождения Землей ОЗН 19 апреля 2010 г. (табл. 1, № 6). И после ОЗН наблюдалось резкое увеличение замедления вращения.

Кроме того, после этой аварии в следующем 2011 г. зафиксированы смещение ОЗН на 3 дня и изменение направления наклона воронки (табл. 1, № 6, 7). Такое изменение наклона депрессии может свидетельствовать о смещении границ подобной структуры более крупного ранга, что требует дополнительных исследований.

Выявлены смещения границ данных периодов на протяжении нескольких лет (2010–2012 гг.). По всей вероятности, эти смещения границ связаны также и со сбоем в их системе, произошедшим 13 марта 2010 г. (в период с 1 по 17 марта 2010 г. после ОЗН). Данный характерный сбой мог произойти из-за перехода орбиты на более высокий спиральный виток. В следующем 2011 г. 13 марта была зафиксирована ОЗН и изменился наклон депрессии (табл. 1, № 9, 10).

Таблица 2

Периоды изменения темпа вращения Земли по орбите, каждый из которых обязательно включает относительный максимум ускорения

№ п/п	Продолжительность периода изменений темпа вращения Земли при движении по орбите, включающего максимум ускорения, сут.	Моменты с экстремальными относительными показателями изменений скорости вращения Земли			Пространственно-временная структура с учетом ее наклона (прямая или обратная)
		Относительный минимум вращения	Относительный максимум ускорения	Относительный минимум вращения	
1	16	12.09.2022	20.09.2022	27.09.2022	Прямая
2	15	19.08.2023	26.08.2023	02.09.2023	Обратная
3	16	02.09.2023	09.09.2023	17.09.2023	Прямая
4	14	17.09.2023	23.09.2023	30.09.2023	Обратная
5	17	21.09.2025	30.09.2025	06.10.2025	Обратная
6	15	02.07.2025	10.07.2025	16.07.2025	Обратная

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования с использованием источника [21].

Необходимо отметить, что, согласно [21], при режиме замедления вращения Земли зафиксированы также широко известные аварии на АЭС в Фукусиме 11 марта 2011 г. в 14 ч 46 мин (при активизации атлантического притока ТЗВ) и на АЭС в Чернобыле 26 апреля 1986 г. в 01 ч 23 мин по местному времени (при усилении тихоокеанского притока ТЗВ). Были выявлены периоды (пространственно-временные орбитальные структуры) с датами этих аварий (табл. 1, № 9–11 и 1–4 соответственно).

Авария на Чернобыльской АЭС произошла на 3 дня раньше ОЗН в этом периоде (29 апреля). Дата аварии соответствует моменту ОЗН в предыдущем 1985 г. (табл. 1, № 1, 2). В связи с этим представляется логичным, что орбита, по которой движется Земля, не абстрактная и не стихийная, а изначально функционирующая как своеобразная «колея» по всем спиральным предыдущим виткам.

Авария на АЭС в Фукусиме была зафиксирована за 2 дня до ОЗН в соответствующий период 2011 г. и через 3 дня после ОЗН в предыдущем 2010 г. (табл. 1, № 10, 9).

С использованием систем транзитных тальвегов и методических приемов, отмеченных в [19; 20], можно выявить склоны

с двумя координатами уклона, на которых функционировали АЭС в Чернобыле и в Фукусиме. С учетом режимов ротации Земли вокруг своей оси в даты аварий данные склоны также развивались в неблагоприятном режиме растяжения в субширотном простирании. Этот неблагоприятный режим усилился в моменты прохождения Землей соответствующих ОЗН.

Исследования показали, что подобный период продолжительностью 11 суток (табл. 1, № 11) является пока экстремально коротким (1 из 30). Кроме того, границы выявленных смежных периодов делят сутки на две части (одна относится к одному периоду, а другая – к смежному). Это подтверждает необходимость измерения скорости вращения Земли дважды в течение суток с учетом режимов ее ротации вокруг своей оси.

На рис. 2 показаны изменения замедления вращения Земли 11 марта, 20 апреля, 26 апреля в 1985, 1986, 2010, 2011 гг. В отмеченные дни в разные годы просматривается различная тенденция изменения замедления: 11 марта и 20 апреля – оно уменьшается, 26 апреля – сначала увеличивается до 2010 г., затем уменьшается.

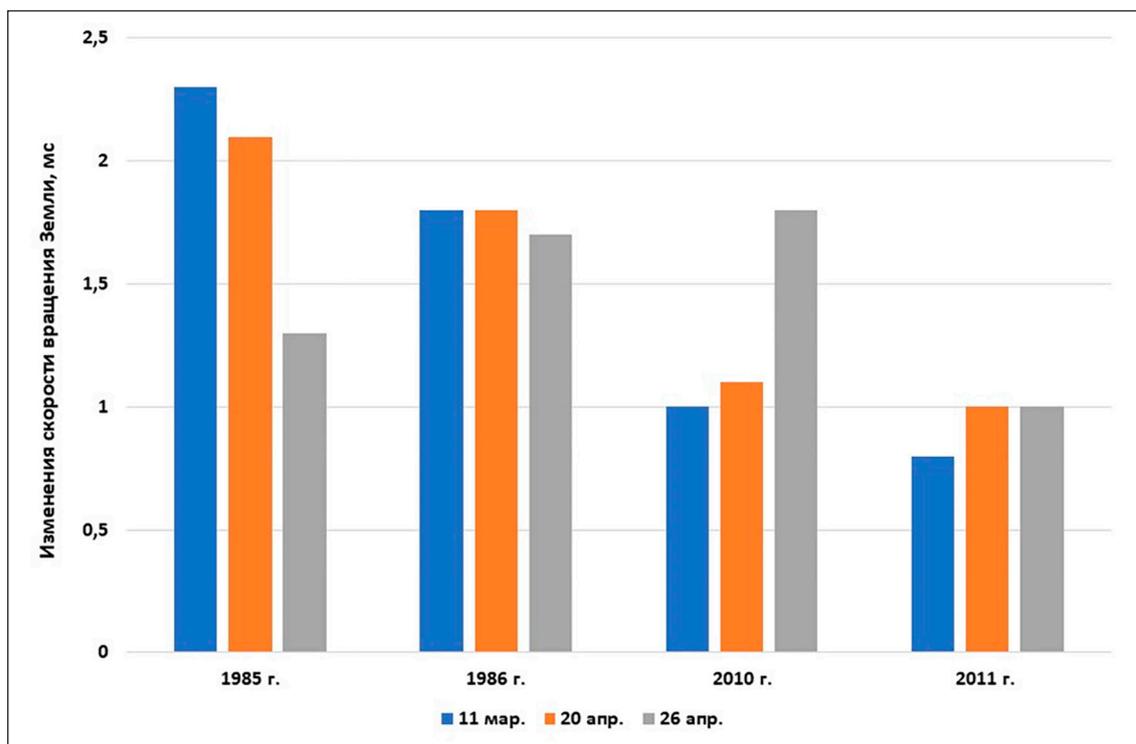


Рис. 2. Изменения замедления вращения Земли 11 марта, 20 апреля, 26 апреля в 1985, 1986, 2010, 2011 гг.
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования с использованием источника [21]

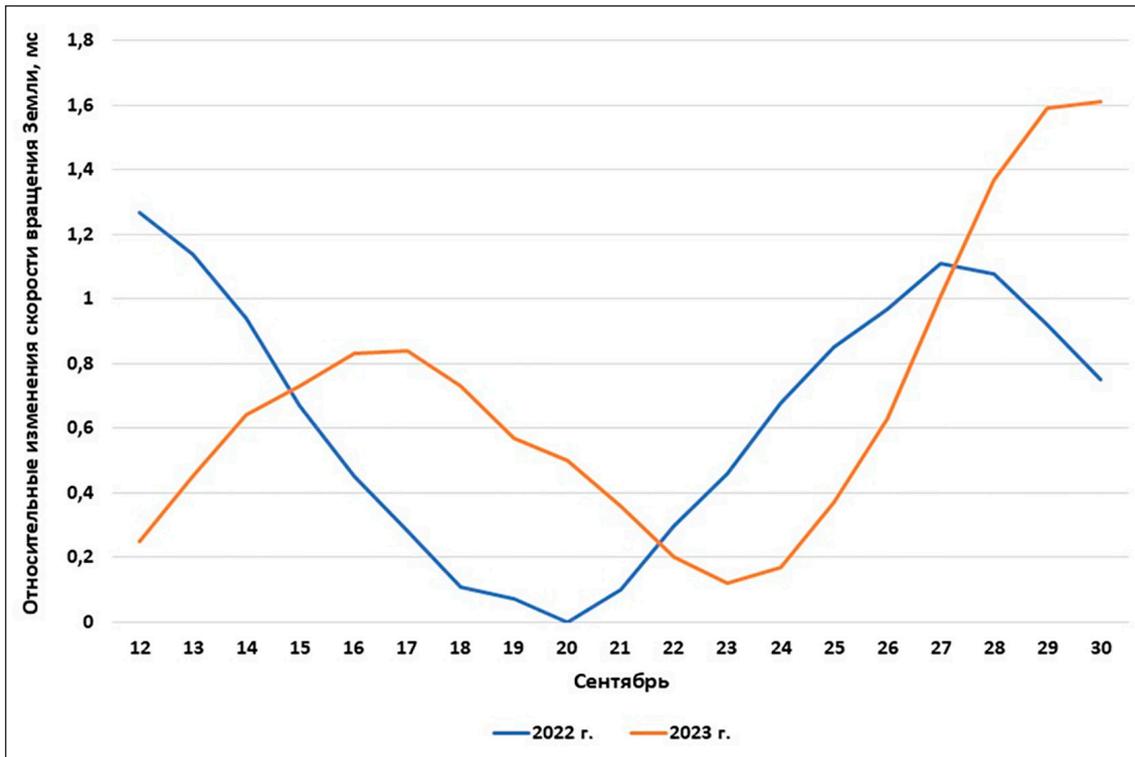


Рис. 3. Относительные изменения скорости вращения Земли с 12 по 30 сентября в 2022 и 2023 гг.
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования с использованием источника [21]

Поэтому при выявлении общих закономерностей замедления или ускорения вращения Земли необходимо учитывать данные по периодам (табл. 1, 2) с экстремальными значениями этих противоположных процессов, в том числе и ОЗН.

С учетом [21] необычные сотрясения (дрожь Земли при ускорении ее вращения), зафиксированные 16–24 сентября 2023 г., также связаны с ОЗН и изменениями неровностей орбитальных витков в 2023 и 2022 гг. (табл. 2, № 1, 3, 4). А гигантский оползень в Гренландии (разрушение соответствующего склона) и мощное цунами [22] являются лишь следствиями данных сотрясений планеты и действия определенного режима вращения Земли.

На рис. 3 показаны выявленные с использованием [21] два периода изменения скорости вращения Земли с 12 по 27 сентября 2022 г. (синяя линия) и с 17 по 30 сентября 2023 г. (красная линия) относительно нуля – наиболее глубокой ОЗН 20 сентября 2022 г. (табл. 2, № 1, 3, 4). Во второй период на фоне ускорения вращения Земли зафиксирована ее дрожь с 16 по 24 сентября 2023 г.

Как видно из рис. 3, в целом депрессия 2022 г. была относительно более глубокой, чем подобная ей 2023 г. Наклон отмеченных депрессий изменился. С 15 по 22 сентября 2023 г. скорости вращения Земли существенно меньше тех, которые были зафиксированы в эти даты в предыдущем 2022 г.

Примечательно, что именно 16 сентября 2023 г. в первый раз были зарегистрированы дрожь Земли и резкое расхождение скоростей вращения в отмеченные годы. Скорости вращения 15 сентября 2023 г. и 15 сентября 2022 г. близки по величине. ОЗН (с максимумами ускорения) зафиксированы 20 сентября 2022 г. (главный) и 23 сентября 2023 г. С 22 сентября 2023 г. ситуация изменилась на обратную: депрессия 2023 г. на орбите стала глубже подобной 2022 г. Дрожь Земли закончилась 24 сентября 2023 г., когда были пройдены ОЗН 2022 и 2023 гг. Таким образом, необходим учет неровностей орбитального пути Земли не только на текущем, но и на предыдущем спиральных витках.

Полученную информацию о закономерных изменениях скорости вращения Земли целесообразно использовать при выявлении

динамики склонов, разработке четких технологических регламентов взаимодействия последних с природно-техногенными объектами (будущими или уже существующими).

Заключение

Новые интегрированные данные о динамике склонов и о ротации Земли позволяют выявить современные геодинамические факторы среды, негативно влияющие на природно-техногенные объекты. Как показали исследования, целесообразно принимать во внимание режимы вращения Земли в течение суток и периоды изменения скорости ее вращения, отражающие особенности орбитального пути. Из-за действия двух различных режимов дренирования земной поверхности (и глубоких горизонтов) при вращении планеты вокруг своей оси каждый выделенный склон может развиваться в конкретное время суток в неблагоприятных условиях, способствующих усилению его расчленения. Это один из геодинамических стресс-факторов среды, который действует через определенные интервалы времени и который необходимо учитывать в экологически чистых геотехнологиях.

С использованием фактических данных Международной службы вращения Земли и принципов определения транзитных тальвегов были впервые выявлены в разные годы достаточно четкие периоды (пространственно-временные структуры), которые показывают взаимосвязи и изменения противоположных процессов замедления и ускорения вращения планеты, а также моменты их неблагоприятных проявлений в точках переходов – ОЗН (с относительным минимумом замедления или максимумом ускорения). При этом значительное замедление вращения планеты после таких переходов способствовало увеличению расчленения склонов разного ранга и созданию неблагоприятных условий для функционирования конкретных природно-техногенных объектов (нефтедобывающей платформы в Мексиканском заливе и АЭС в Чернобыле и Фукусиме).

Длительность выделенных периодов закономерного изменения скорости вращения Земли составляет от 11 (пока экстремально короткая) до 17 суток. Этот диапазон может быть немного расширен из-за ограниченных (по числу) сбоев в их системе в моменты неблагоприятного перехода спиральной орбиты с одного витка на другой.

Подобные временные периоды прохождения Землей депрессий на орбитальном пути отражают дополнительные стресс-фак-

торы, которые связаны с изменениями темпов замедления или ускорения, а также с ОЗН в предыдущие (до аварий) годы и в целом с накоплением негативных изменений. Такие обстоятельства заставляют более широко и детально исследовать подобные депрессии, функционирующие в пределах орбитального пути Земли, и прогнозировать развитие ОЗН разного ранга. Это большие данные, требующие систематизации и цифровизации всей информации об изменениях скорости вращения Земли по конкретному показанному выше принципу. Полученная в итоге новая информация позволяет выявлять закономерности изменений орбитального пути Земли и возможное усиление негативных ситуаций для природно-техногенных объектов, расположенных на земной поверхности на конкретных склонах (с двумя координатами наклона и с элементом естественного управления процессами денудации).

Проведенные исследования также показали, что назрела необходимость экспертизы аварийных нефтяных и газовых скважин (а также и тех, которым требуется частый ремонт) на предмет влияния на них динамики склонов и склоновых процессов на разных глубинах, обусловленных ротационным фактором. При этом требуется анализ всего массива имеющихся фактических данных как промысловых, геологических, так и по изменениям скорости вращения Земли. Такая экспертиза будет способствовать созданию в перспективе уникальных цифровых моделей динамики рельефа склонов с показом наиболее уязвимых их частей к растяжению в определенном простирании и проявлениям агрессивных процессов усиления сноса вещества земной поверхности.

Список литературы

1. Имаева Л. П., Гусев Г. С., Имаев В. С., Ашурков С. В., Мельникова В. И., Середкина А. И. Геодинамическая активность новейших структур и поля тектонических напряжений северо-востока Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 737–768. URL: <https://www.gt-crust.ru/jour/article/view/469/335> (дата обращения: 12.02.2026). DOI: 10.5800/GT-2017-8-4-0315.
2. Жиров Д. В., Климов С. А., Пантелеев А. В., Жирова А. М. Выделение факторов контроля геодинамических опасностей на примере 3D геолого-структурной модели природно-технологической системы «Рудник Расвумчоррский – карьер Центральный» (Хибинны) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 7. С. 200–226. EDN: WGBMDF.
3. Бычков С. Г., Долгань А. С., Симанов А. А. Вычисления аномалий силы тяжести при высокоточных гравиметрических съемках. Пермь: Изд-во Горного ин-та УрО РАН, 2015. 142 с. ISBN 978-5-7691-2414-3.
4. Соколова Н. В. Роль узлов транзитных тальвегов в современном развитии Черного моря // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2023. Т. 9. № 1. С. 233–243. EDN: EMEWMM.

5. Соколова Н. В. Районирование территорий с учетом природных структур управления гидро- и литодинамическими потоками // *Успехи современного естествознания*. 2020. № 9. С. 100–105. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37478> (дата обращения: 04.12.2025). DOI: 10.17513/use.37478.
6. Moretti G., Orlandini S. Thalweg and Ridge Network Extraction from Unaltered Topographic Data as a Basis for Terrain Partitioning // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2023. Vol. 128 (4). DOI: 10.1029/2022JF006943.
7. Young A., Albertson J. D., Moretti D., Orlandini S. Real-Time Flood Inundation Modelling with Flow Resistance Parameter Learning // *Water Resources Research*. 2025. Vol. 61 (1). DOI: 10.1029/2024WR038424.
8. Xiao T., Zhu L., Wang L., Yang B., Wang C., Yao H. An Automated and Efficient Slope Unit Division Method Coupled with Computer Graphics and Hydrological Principles // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15 (9). P. 4647. DOI: 10.3390/app15094647.
9. Ребецкий Ю. Л., Мягков Д. С. Обратные задачи геодинамики и роль ротационных инерционных сил (Ответ на работу А. В. Викулина «Проблема ротационных движений в геологии») // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2016. Вып. 30. № 2. С. 88–95. URL: <http://repo.kscnet.ru/2715/> (дата обращения: 10.02.2026).
10. Ретеев А. Ю. Изменение климата при нестабильном вращении Земли // *Среда обитания*. 2023. № 2. С. 165–169. DOI: 10.53115/19975996_2023_02_165-169.
11. Зотов Л. В., Бизуар К. Почему Земля вращается неравномерно и как это влияет на счет времени // *Природа*. 2021. № 3. С. 26–29. URL: https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/436151/Pochemu_Zemlya_vrashchaetsya_neravnomerno_i_kak_eto_vliyaet_na_schet_vremeni (дата обращения: 03.12.2025).
12. Bendick R., Bilham R. Do weak global stresses synchronize earthquakes? // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44. P. 8320–8327. DOI: 10.1002/2017GL074934.
13. Борисов К. И., Горшков Л. К., Софьин А. П., Федорова Л. А. Природно-техногенные катастрофы как проявления геодинамической нестабильности земной коры // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2019. Т. 330. № 6. С. 126–133. URL: <https://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/2134/1980> (дата обращения: 03.12.2025). DOI: 10.18799/24131830/2019/6/2134.
14. Стаханова А. Мексиканский разлив. Со времен «американского Чернобыля» прошло 10 лет. Катастрофа может повториться // *Lenta.ru*. 22 апреля 2020 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://lenta.ru/photo/2020/04/22/deepwaterhorizon/> (дата обращения: 03.12.2025).
15. «Залив Америки» скоро появится в Google Maps в США. [Электронный ресурс]. URL: <https://mosregtoday.ru/news/soc/v-google-maps-soobschili-kogda-na-kartah-pojavitsja-zaliv-ameriki/> (дата обращения: 09.12.2025).
16. Атлас мира / Под ред. А. Н. Баранова. М., 1954. 284 с.
17. Caribbean Sea Gulf of Mexico shaded relief bathymetry land map.png [Электронный ресурс]. URL: <https://commons.wikimedia.org> (дата обращения: 21.12.2025).
18. Орлов В. И. Динамическая география. М.: Научный мир, 2006. 594 с. ISBN 5-89176-352-4.
19. Соколова Н. В. Мониторинг геологических процессов высокого ранга с использованием системы транзитных тальвегов // *Пространственные данные: наука и технологии*. 2024. Т. 15. № 2. С. 43–58. URL: https://miigaik.ru/journal/spatial_data/2024/15-2/SD_2024_15_2.pdf (дата обращения: 09.12.2025). DOI: 10.30533/scidata-2024-15-10.
20. Соколова Н. В., Макаров О. А., Якушев Н. Л. Многоэтапный мониторинг динамики почв с учетом пределов действия склонов // *Роль почв в биосфере и жизни человека: материалы II Международной научной конференции, посвященной 110-летию со дня рождения академика Г. В. Добровольского и 270-летию Московского университета (Москва, МГУ, 27–30 октября 2025 г.)* / Отв. ред.: С. А. Шоба, Н. О. Ковалева, Е. М. Столпникова. М.: МАКС-Пресс. 2025. С. 52–55. URL: https://conf.msu.ru/file/event/9837/eid9837_attach_97e08b56eb0d0f9413a0d9e1d1c54b4c4526ff82.pdf (дата обращения: 15.02.2026). ISBN 978-5-317-07493-7.
21. Graham J., Bikos K., Hocken V. A Day is Not Exactly 24 Hours. [Электронный ресурс]. URL: <https://thesputnikorbit.blogspot.com/2021/07/a-day-is-not-exactly-24-hours.html> (дата обращения: 15.12.2025).
22. Svennevig K., Hicks S.-P., Forbriger T., Lecoco T. et al. A rockslide – generated tsunami in a Greenland fjord rang Earth for 9 days // *Science*. 2024. Vol. 385. Is. 6714. P. 1196–1205. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adm9247> (дата обращения: 15.12.2025). DOI: 10.1126/science.adm9247.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания, тема № 125021302095-2.

Financing: The work was carried out within the framework of the state assignment, topic No. 125021302095-2.

СТАТЬИ

УДК 504.064.4:556
DOI 10.17513/use.38479



CC BY 4.0

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ
КОНЦЕНТРАЦИЙ МЕТАЛЛОВ
В ВОДАХ РЕКИ НАРЫН (2020–2024 ГОДЫ)**

¹Алиева Э. А., ²Оторова С. Т., ¹Тотубаева Н. Э.

¹Кыргызско-Турецкий университет «Манас», Бишкек, Республика Кыргызстан,
e-mail: nurzat.totubaeva@manas.edu.kg;

²Нарынский государственный университет имени С. Нааматова,
Нарын, Республика Кыргызстан

В условиях усиления антропогенного воздействия на водные экосистемы особую актуальность приобретает изучение пространственно-временной изменчивости концентраций металлов в речных водах. В данной статье представлены результаты анализа концентраций металлов Ba, Al, Fe, Mn и Sr в водах р. Нарын за период с 2020 по 2024 г. Учет загрязнения воды данными микроэлементами имеет ряд характерных особенностей. Эти элементы могут поступать как из природных источников (за счет выветривания горных пород), так и в результате антропогенной деятельности (промышленные и коммунальные стоки, горнодобывающие предприятия). Их повышенные концентрации, даже если они частично обусловлены естественным геохимическим фоном, могут оказывать негативное влияние на водные организмы и на здоровье населения, использующего воду для хозяйственных нужд. Цель исследования – на основе статистического анализа данных за 2020–2024 гг. оценить временные и пространственные изменения концентраций металлов в водах р. Нарын. Пробы воды были отобраны на десяти контрольных участках, расположенных вдоль течения реки, с соблюдением требований нормативных документов, а определение микрокомпонентного состава вод проводилось в аккредитованной лаборатории компании Stewart Assay and Environmental Laboratories LLC методом атомно-эмиссионной спектроскопии. Результаты исследования показали, что концентрации большинства металлов характеризуются относительной стабильностью, при этом выявлены выраженные пространственно-временные колебания содержания отдельных элементов. Установленные закономерности указывают на влияние антропогенных факторов, в том числе хозяйственной деятельности г. Нарын и функционирования золоторудных месторождений «Макмал» и «Кумтор». Вместе с тем значительные расходы воды в р. Нарын способствуют процессам естественного разбавления загрязняющих веществ, что снижает совокупное воздействие техногенных источников на качество водной экосистемы и обосновывает необходимость продолжения мониторинговых исследований.

Ключевые слова: река Нарын, загрязнение, микроэлементы, статистический анализ

**SPATIAL AND TEMPORAL CHANGES IN METAL
CONCENTRATIONS IN THE NARYN RIVER (2020–2024)**

¹Alieva E. A., ²Otorova S. T., ¹Totubaeva N. E.

¹Kyrgyz-Turkish University “Manas”, Bishkek, Kyrgyz Republic,
e-mail: nurzat.totubaeva@manas.edu.kg;

²Naryn State University named after S. Naamatov, Naryn, Kyrgyz Republic

With the increasing anthropogenic impact on aquatic ecosystems, studying the spatial and temporal variability of metal concentrations in river waters is becoming particularly relevant. This article presents the results of an analysis of the concentrations of Ba, Al, Fe, Mn, and Sr metals in the waters of the Naryn River for the period 2020–2024. Accounting for water pollution with these trace elements has a number of distinctive features. These elements can come from natural sources (through the weathering of rocks) or as a result of human activity (industrial and municipal wastewater, mining enterprises). Their elevated concentrations, even if they are partly due to the natural geochemical background, can have a negative impact on aquatic organisms and the health of the population using water for domestic needs. The aim of the study is to assess temporal and spatial changes in metal concentrations in the waters of the Naryn River based on statistical analysis of data for 2020–2024. Water samples were collected at ten control sites located along the river, in compliance with regulatory requirements, and the microcomponent composition of the water was determined in an accredited laboratory of Stewart Assay and Environmental Laboratories LLC using atomic emission spectrometry. The results of the study showed that the concentrations of most metals are relatively stable, while pronounced spatial and temporal fluctuations in the content of certain elements were identified. The patterns identified indicate the influence of anthropogenic factors, including the economic activity of the city of Naryn and the operation of the Makmal and Kumtor gold deposits. At the same time, significant water consumption in the Naryn River contributes to the natural dilution of pollutants, which reduces the cumulative impact of anthropogenic sources on the quality of the aquatic ecosystem and justifies the need for continued monitoring studies.

Keywords: Naryn River, pollution, trace elements, statistical analysis

Введение

Кыргызстан – горная страна, в которой ледники занимают до 4,5 % от общей территории. Их общая площадь составляет около 8047,8 км². Ледники в Кыргызстане занимают практически всю западную половину внутриконтинентальной и горной гряды Тянь-Шаня и части хребта Памиро-Алая и имеют устойчивое оледенение [1]. Река Нарын – самая крупная река Кыргызской Республики, после слияния с р. Карадарья образует Сырдарью – одну из двух основных рек Центральной Азии [2]. Водность реки используется на орошение пахотных земель в бассейне р. Нарын и на водообеспечение г. Нарын и населенных пунктов по течению реки в засушливый летний период [3].

Нарын – самая многоводная река Кыргызстана – течет с востока на запад по территории Кыргызстана и Узбекистана, является правой составляющей Сырдарьи. Река Нарын втекает на территорию Узбекистана в районе г. Учкурган, протекает по территории Наманганской области и около г. Балыкчи сливается с р. Карадарья [4]. Длина р. Нарын составляет 534 км (вместе с р. Большой Нарын – 807 км), площадь водосбора 58 370 км². На своем пути она принимает 130 притоков протяженностью свыше 10 км и около 500 менее значительных речек и ручьев. Нарын течет по межгорным долинам, местами в узких ущельях [5].

Гидрохимический состав вод формируется по гидрокарбонатно-кальциевому типу. Это определяет ключевые свойства воды: низкую общую минерализацию, нейтральные значения рН и умеренный уровень жесткости.

Основу водного баланса реки составляют ледниковые и снеговые воды. Ледниковое питание играет значительную роль, водный режим реки формируется за счет таяния ледников и сезонных снегов в высокогорных районах Центрального Тянь-Шаня, где берет начало река. Доля грунтовых вод, по некоторым данным, в общем питании реки составляет около 44 %. Половодье проходит в период с мая по август. Норма стока 480 м³/с [6].

На протяжении всего своего течения р. Нарын имеет разнообразную морфологию, самые крупные пойменные участки расположены в центральной части водосбора ниже по течению от г. Нарын. Исток р. Нарын начинается в северо-западной части от слияния двух рек, Большого и Малого Нарына, и от ледников горного хребта

Ак-Шиирак. Затем в Ферганской долине эта река сливается с Карадарьей. В целом около 2 % площади бассейна занимают ледники Центрального Тянь-Шаня (около 2074 ледника общей площадью 1357,8 км²). Вклад этих ледников в ежегодный сток воды значителен. Растительность в пойменных районах представлена такими видами, как тополь, ива, облепиха, кизильник, спирея, тамариск, роза и астра узколистная.

Климат бассейна р. Нарын является континентальным и характеризуется холодной продолжительной зимой и жарким коротким летом. Суточные колебания температур являются экстремальными, заморозки могут наблюдаться даже летом [7]. В хозяйственных целях вода р. Нарын используется для орошаемого земледелия – для этих нужд от нее проложены Большой Ферганский и Северный Ферганский каналы. Река также обладает значительными гидроэнергетическими ресурсами, на ней расположены Токтогульское и Курпсайское водохранилища и каскады ГЭС: Токтогульская, Таш-Кумырская, Учкурганская, Курпсайская, Шамалдысайская и Камбаратинская [8].

В настоящее время первостепенной и очень важной является оценка химического состава природных вод, донных отложений реки и их постоянный мониторинг [9]. Изучение концентраций тяжелых металлов в поверхностных водах суши и причин повышения их концентраций на региональном уровне является одной из актуальных проблем экологии [10]. Определение содержания металлов в водных объектах включают в программы экологического мониторинга, так как от концентрации этих элементов зависит качество воды [11].

Значимость статистических методов в экологии определяется как самим характером современных исследований в этих областях, так и естественными свойствами объектов изучения. Современная статистика оказывается столь полезной при обработке численных данных в биологии и экологии именно потому, что она основана на признании этой изменчивости и обладает мощными средствами ее учета. Подтверждение существования изменчивости достигается посредством использования методов статистического анализа [12, с. 15].

Цель исследования – на основе статистического анализа данных за 2020–2024 гг. оценить временные и пространственные изменения концентраций металлов в водах р. Нарын.

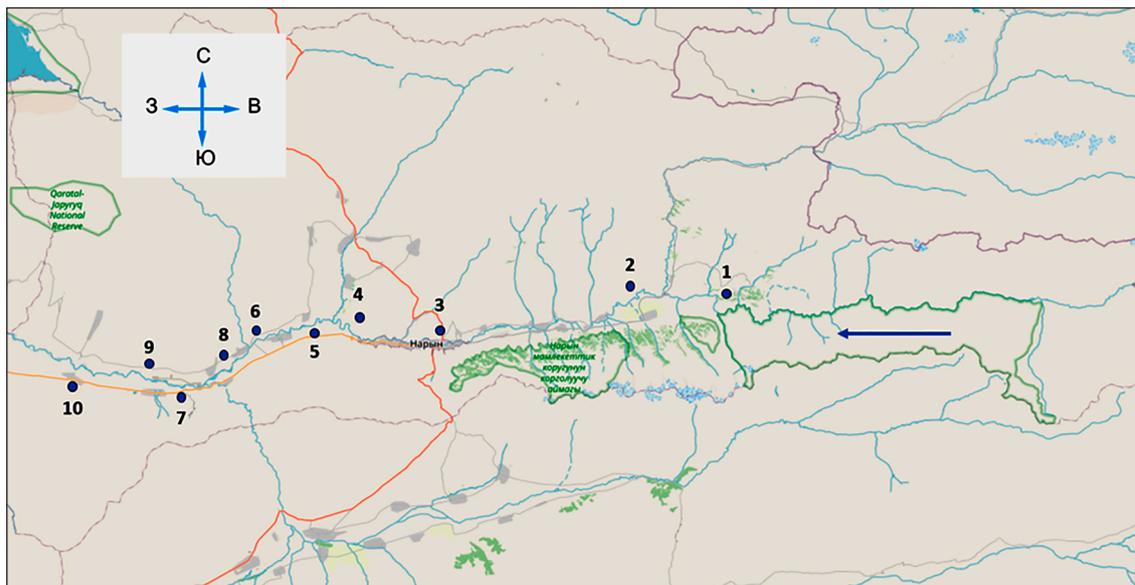


Рис. 1. Пункты отбора проб вдоль р. Нарын (масштаб: 1:500000, программа ArcGis)
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 1

Характеристика точек отбора проб воды в бассейне р. Нарын

№ точки	Название и расположение точки	Особенности точки (цель отбора)
1	Р. Большой Нарын, выше слияния с Малым Нарыном	Контроль фонового состава вод, формирующих основной сток р. Нарын
2	Р. Малый Нарын	Оценка вклада одного из истоков в общий химический состав реки
3	Р. Нарын, выше г. Нарын (район Сейил-Булак)	Контроль «фона» непосредственно перед городом, оценка исходного состояния воды
4	Р. Нарын, ниже г. Нарын (район Ак-Кия)	Оценка непосредственного влияния городской деятельности на качество воды
5	Р. Ат-Башы, выше с. Ат-Башы	Определение исходного состояния воды притока Ат-Башы
6	Р. Ат-Башы, ниже с. Ат-Башы (ниже моста)	Оценка воздействия жилой застройки и возможных неорганизованных стоков села
7	Р. Ат-Башы, ниже ПГТ Достук (после моста)	Оценка совокупного влияния населенных пунктов на приток Ат-Башы перед его впадением в Нарын
8	Р. Кажырты, до впадения в р. Нарын	Оценка потенциального влияния горнодобывающей деятельности на малые водотоки
9	Р. Нарын, район ДЭУ	Контроль интегрального состояния реки после смешения вод основных притоков
10	Р. Салкын-Төр (малый водоток)	Оценка состояния малых водных объектов, наиболее чувствительных к локальному загрязнению

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в период с августа 2020 г. по сентябрь 2024 г. Для анализа были выбраны 10 контрольных точек отбора проб вдоль течения реки (рис. 1).

Для оценки пространственной изменчивости качества вод было выбрано 10 кон-

трольных точек, расположенных на основном русле р. Нарын и ее ключевых притоках (Ат-Башы, Кажырты, Салкын-Төр). Выбор точек был обусловлен необходимостью контроля фоновых участков, зон влияния населенных пунктов и горнодобывающей деятельности. Подробная характеристика точек представлена в табл. 1.

В работе проведен статистический анализ данных о концентрациях металлов в воде р. Нарын, полученных из официальных источников Кыргызгидромета. Общий анализ позволил определить годы и пункты отбора проб, характеризующиеся максимальными значениями концентраций исследуемых металлов. Отбор проб воды проводился в соответствии с установленными требованиями; пробы отбирались в центральной части водного потока с примерно одинаковой (максимальной) глубины. В каждом пункте наблюдений отбиралась одна проба воды. Отобранные пробы немедленно консервировались и доставлялись в лабораторию для оперативного анализа.

Статистический анализ. Основными средствами анализа данных в MS Excel являются статистические и математические функции библиотеки встроенных функций, статистические процедуры и специальный инструмент [12, с. 17]. Для проведения статистических расчетов в Microsoft Excel имеется надстройка Пакет анализа. Вычисления могут проводиться посредством команды Данные – Анализ данных – Описательная статистика, а также средствами встроенных функций MS Excel [13, с. 34]. Для анализа данных по р. Нарын за период 2020–2024 гг. использовались стандартные методы описательной статистики, включающие расчет средних, показателей вариации и распределения.

Для анализа исходных данных применялись методы описательной статистики. В рамках исследования были рассчитаны показатели положения и разброса распределения, включая среднее арифметическое, медиану, стандартную ошибку среднего, дисперсию, стандартное отклонение, а также показатели формы распределения (эксцесс).

Среднее арифметическое и медиана использовались для характеристики центральной тенденции исследуемых показателей, при этом медиана позволяла снизить влияние выбросов и асимметрии распределения. Стандартная ошибка среднего применялась для оценки точности выборочной оценки относительно генеральной совокупности. Показатели разброса (дисперсия и стандартное отклонение) использовались для оценки вариабельности значений относительно среднего уровня.

Для характеристики формы распределения рассчитывался эксцесс, отражающий степень концентрации значений вокруг среднего. Минимальные и максимальные значения использовались для определения границ варьирования концентраций исследуемых элементов.

Применение методов описательной статистики осуществлялось на этапе предварительной обработки данных и обеспечивало корректность и достоверность последующих аналитических выводов. Расчеты выполнялись с использованием стандартных статистических процедур, описанных в литературе [14, с. 49–54; 15, с. 24–26].

Результаты исследования и их обсуждение

На основе данных концентраций металлов в воде р. Нарын, предоставленных Кыргызгидрометом, выполнен статистический анализ концентрации бария, алюминия, железа, марганца и стронция по пунктам отбора проб и за годы наблюдений. Результаты расчетов основных показателей описательной статистики представлены в табл. 2–11 и отражают пространственно-временную вариабельность исследуемых элементов.

Таблица 2

Статистические характеристики содержания бария в воде реки в 2020–2024 гг. (мг/л)

Дата отбора проб	\bar{x}	$S_{\bar{x}}$	Me	σ	σ^2	Ex	min	max
Август 2020 г.	0,0654	0,0067	0,0590	0,0210	0,0005	-1,8	0,037	0,093
Февраль 2021 г.	0,0622	0,0046	0,0585	0,0145	0,0002	-1,25	0,038	0,081
Август 2021 г.	0,0591	0,0071	0,0490	0,0220	0,0005	-1,18	0,029	0,094
Ноябрь 2022 г.	0,0681	0,0060	0,0650	0,0180	0,0004	-1,77	0,042	0,093
Май 2024 г.	0,0795	0,0087	0,0715	0,0275	0,0008	-1,43	0,044	0,118
Сентябрь 2024 г.	0,0806	0,0054	0,0830	0,0171	0,0003	-1,5	0,054	0,102

Примечание: \bar{x} – среднее арифметическое, $S_{\bar{x}}$ – стандартная ошибка, Me – медиана, σ – стандартное отклонение, σ^2 – дисперсия выборки, Ex – эксцесс, min – минимум, max – максимум; составлена авторами на основе данных Кыргызгидромета в ходе исследования.

Таблица 3

Статистические показатели содержания бария в воде по пунктам отбора проб вдоль течения реки (мг/л)

Пункты отбора проб	\bar{x}	$S_{\bar{x}}$	Me	σ	σ^2	Ex	min	max
Точка 1	0,0694	0,0086	0,071	0,0087	0,0004	0,4305	0,045	0,097
Точка 2	0,0434	0,0058	0,042	0,0058	0,0002	2,1826	0,029	0,064
Точка 3	0,058	0,0050	0,059	0,0050	0,0001	-1,6859	0,043	0,069
Точка 4	0,0608	0,0083	0,054	0,0083	0,0003	2,1274	0,043	0,091
Точка 5	0,096	0,0061	0,091	0,0061	0,0002	1,2049	0,081	0,117
Точка 6	0,097	0,0065	0,094	0,0065	0,0002	0,9754	0,078	0,118
Точка 7	0,0852	0,0052	0,084	0,0052	0,0001	3,06288	0,076	0,105
Точка 8	0,0576	0,0028	0,058	0,0028	3,83E-05	0,6924	0,048	0,063
Точка 9	0,0816	0,0040	0,082	0,0040	8,03E-05	0,2710	0,072	0,095
Точка 10	0,05	0,0013	0,05	0,0013	8,5E-06	0,8927	0,046	0,054

Примечание: составлена авторами на основе данных Кыргызгидромета в ходе исследования.

Таблица 4

Статистические характеристики содержания алюминия в воде реки в 2020–2024 гг. (мг/л)

Дата отбора проб	\bar{x}	$S_{\bar{x}}$	Me	σ	σ^2	Ex	min	max
Август 2020 г.	0,211	0,0341	0,2	0,1078	0,0116	0,3359	0,03	0,41
Август 2021 г.	0,06	0,0084	0,07	0,0267	0,0007	-2,0949	0,03	0,09
Ноябрь 2022 г.	0,142	0,0443	0,08	0,1401	0,0196	4,2858	0,03	0,49
Май 2024 г.	1,329	0,1841	1,34	0,5822	0,3389	1,9619	0,03	2,04
Сентябрь 2024 г.	0,619	0,2397	0,255	0,7581	0,5747	-0,5025	0,03	1,9

Примечание: из-за слишком низкой концентрации алюминия (< 0,03) в феврале 2021 г. этот показатель был исключен из расчетов. Составлена авторами на основе данных Кыргызгидромета в ходе исследования.

Таблица 5

Статистические показатели содержания алюминия в воде по пунктам отбора проб вдоль течения реки (мг/л)

Пункты отбора проб	\bar{x}	$S_{\bar{x}}$	Me	σ	σ^2	Ex	min	max
Точка 1	0,568	0,2593	0,22	0,5798	0,33612	-3,2413	0,07	1,23
Точка 2	0,83	0,3293	0,49	0,7364	0,54235	-0,8210	0,09	1,9
Точка 3	0,388	0,1873	0,31	0,4188	0,17537	2,7084	0,06	1,09
Точка 4	0,732	0,3821	0,18	0,8544	0,73007	-2,3870	0,09	1,88
Точка 5	0,46	0,3954	0,07	0,8842	0,7818	4,9566	0,03	2,04
Точка 6	0,476	0,3696	0,13	0,8265	0,68308	4,8788	0,03	1,95
Точка 7	0,474	0,3316	0,13	0,7414	0,54973	4,6777	0,07	1,79
Точка 8	0,282	0,1794	0,13	0,4012	0,16097	4,4611	0,03	0,99
Точка 9	0,482	0,2722	0,27	0,6086	0,37037	4,2529	0,08	1,55
Точка 10	0,03	0	0,03	0	0	0	0,03	0,03

Примечание: составлена авторами на основе данных Кыргызгидромета в ходе исследования.

Таблица 6

Статистические характеристики содержания железа в воде реки в 2020–2024 гг. (мг/л)

Дата отбора проб	\bar{x}	$S_{\bar{x}}$	Me	σ	σ^2	Ex	min	max
Август 2020 г.	0,1444	0,0293	0,13	0,0926	0,0086	2,2503	0,004	0,35
Февраль 2021 г.	0,021	0,0061	0,018	0,0192	0,0004	5,2670	0,004	0,07
Август 2021 г.	0,0274	0,0050	0,03	0,0157	0,0002	-1,357	0,004	0,05
Ноябрь 2022 г.	0,1477	0,0706	0,0645	0,2233	0,0499	6,9430	0,004	0,745
Май 2024 г.	0,8883	0,1240	0,893	0,3921	0,1538	2,0142	0,012	1,35
Сентябрь 2024 г.	0,8259	0,3377	0,2135	1,0678	1,1403	-0,6650	0,004	2,59

Примечание: составлена авторами на основе данных Кыргызгидромета в ходе исследования.

Таблица 7

Статистические показатели содержания железа в воде по пунктам отбора проб вдоль течения реки (мг/л)

Пункты отбора проб	\bar{x}	$S_{\bar{x}}$	Me	σ	σ^2	Ex	min	max
Точка 1	0,4763	0,2875	0,115	0,7042	0,4959	2,3566	0,022	1,78
Точка 2	0,77	0,3921	0,5475	0,9605	0,9226	3,3061	0,01	2,59
Точка 3	0,2648	0,1305	0,107	0,3198	0,1022	-1,57	0,011	0,729
Точка 4	0,6142	0,4191	0,0675	1,0265	1,0536	3,6251	0,019	2,59
Точка 5	0,255	0,2176	0,0405	0,5330	0,2841	5,8814	0,004	1,34
Точка 6	0,2945	0,2131	0,099	0,5220	0,2725	5,6068	0,01	1,35
Точка 7	0,2678	0,1841	0,0885	0,4509	0,2033	5,6192	0,02	1,18
Точка 8	0,1902	0,0953	0,099	0,2335	0,0545	4,5755	0,02	0,65
Точка 9	0,2863	0,1561	0,157	0,3824	0,1462	4,6045	0,032	1,04
Точка 10	0,0053	0,0013	0,004	0,0033	1,07E-05	6	0,004	0,012

Примечание: составлена авторами на основе данных Кыргызгидромета в ходе исследования.

Таблица 8

Статистические характеристики содержания марганца в воде реки в 2020–2024 гг. (мг/л)

Дата отбора проб	\bar{x}	$S_{\bar{x}}$	Me	σ	σ^2	Ex	min	max
Август 2020 г.	0,0392	0,0052	0,037	0,0164	0,0003	2,1960	0,007	0,071
Февраль 2021 г.	0,0098	0,0021	0,0085	0,0068	4,6E-05	7,1540	0,005	0,028
Август 2021 г.	0,0133	0,0038	0,0095	0,0121	0,0001	-0,772	0,001	0,034
Ноябрь 2022 г.	0,0543	0,0165	0,035	0,0522	0,0027	-0,9307	0,003	0,148
Май 2024 г.	0,1246	0,0179	0,118	0,0565	0,0032	2,1680	0,004	0,221
Сентябрь 2024 г.	0,0777	0,0272	0,0355	0,0859	0,0074	-1,0398	0,006	0,219

Примечание: составлена авторами на основе данных Кыргызгидромета в ходе исследования.

Анализ временной динамики показателей выявил, что наибольшие значения среднего арифметического для бария (Ba, табл. 2) и стронция (Sr, табл. 10) наблюдались в сентябре 2024 г., тогда как максимальные концентрации алюминия

(Al, табл. 4), железа (Fe, табл. 6) и марганца (Mn, табл. 8) зафиксированы в мае 2024 г. Минимальные значения зарегистрированы: для Ba и Al – в августе 2021 г., для Mn и Fe – в феврале 2021 г., для Sr – в мае 2024 г.

Таблица 9

Статистические показатели содержания марганца по пунктам отбора проб вдоль течения реки (мг/л)

Пункты отбора проб	\bar{x}	$S_{\bar{x}}$	Me	σ	σ^2	Ex	min	max
Точка 1	0,1083	0,0338	0,1095	0,0828	0,0069	-1,8461	0,009	0,219
Точка 2	0,0728	0,0275	0,066	0,0673	0,0045	-0,9289	0,006	0,177
Точка 3	0,0572	0,0225	0,043	0,0550	0,0030	3,8665	0,008	0,163
Точка 4	0,0875	0,0308	0,073	0,0755	0,0057	-1,0780	0,009	0,203
Точка 5	0,0298	0,0186	0,008	0,0455	0,0021	4,3056	0,002	0,119
Точка 6	0,0327	0,0176	0,017	0,0432	0,0019	4,2175	0,003	0,117
Точка 7	0,0317	0,0143	0,019	0,0351	0,0012	4,6422	0,007	0,101
Точка 8	0,0577	0,0330	0,0275	0,0809	0,0065	5,5567	0,009	0,221
Точка 9	0,0492	0,0159	0,0515	0,0391	0,0015	1,4583	0,01	0,117
Точка 10	0,0047	0,001	0,005	0,0024	5,87E-06	-1,1428	0,001	0,007

Примечание: составлена авторами на основе данных Кыргызгидромета в ходе исследования.

Таблица 10

Статистические характеристики содержания стронция в воде реки в 2020–2024 гг. (мг/л)

Дата отбора проб	\bar{x}	$S_{\bar{x}}$	Me	σ	σ^2	Ex	min	max
Август 2020 г.	0,7927	0,1999	0,5565	0,6322	0,3997	6,0601	0,358	2,447
Февраль 2021 г.	0,89	0,2593	0,59	0,8199	0,6723	4,9805	0,4	2,97
Август 2021 г.	0,8761	0,2423	0,6215	0,7661	0,5870	7,2581	0,379	2,94
Ноябрь 2022 г.	0,7953	0,2242	0,5395	0,7089	0,5025	7,1891	0,319	2,702
Май 2024 г.	0,6664	0,1479	0,5465	0,4677	0,2188	7,0911	0,282	1,92
Сентябрь 2024 г.	0,9439	0,2458	0,599	0,7774	0,6044	1,8766	0,32	2,69

Примечание: составлена авторами на основе данных Кыргызгидромета в ходе исследования.

Таблица 11

Статистические показатели содержания стронция в воде по пунктам отбора проб вдоль течения реки (мг/л)

Пункты отбора проб	\bar{x}	$S_{\bar{x}}$	Me	σ	σ^2	Ex	min	max
Точка 1	0,412	0,0141	0,4195	0,0346	0,0012	-1,4762	0,364	0,453
Точка 2	0,3908	0,0574	0,339	0,1406	0,0198	4,3528	0,282	0,666
Точка 3	0,7593	0,2244	0,5505	0,5495	0,3020	5,5887	0,43	1,87
Точка 4	0,4838	0,0340	0,4545	0,0834	0,0070	-0,1581	0,401	0,62
Точка 5	0,5757	0,0250	0,564	0,0612	0,0038	3,7644	0,521	0,693
Точка 6	0,5742	0,0330	0,5455	0,0809	0,0066	3,3942	0,493	0,727
Точка 7	0,7282	0,1098	0,642	0,2689	0,0723	5,4887	0,546	1,27
Точка 8	1,1637	0,1412	1,2215	0,3459	0,1196	-0,2603	0,715	1,68
Точка 9	0,9903	0,3902	0,6055	0,9559	0,9138	5,9662	0,541	2,94
Точка 10	2,196	0,3785	2,5685	0,9271	0,8595	3,0854	0,447	2,97

Примечание: составлена авторами на основе данных Кыргызгидромета в ходе исследования.

Таким образом, большая часть данных указывает на то, что концентрации металлов достигали максимума в 2024 г. и были минимальными в 2021 г., особенно в зимний период.

Пространственное распределение. Средние значения по пунктам отбора показали, что наибольшие концентрации Ва наблюдались в точке 6 (табл. 3), Al и Fe – в точке 2 (табл. 5, 7), Mn – в точке 1 (табл. 9). Точки 1 и 2 расположены ниже по течению вблизи золоторудного месторождения «Кумтор», это объясняет повышенные уровни загрязнения в этих районах. Концентрация Sr оказалась наибольшей в точке 10 (табл. 11), расположенной в нижнем течении реки. Минимальные значения Al, Fe и Mn отмечены в точке 10, Ва и Sr – в точке 2, что свидетельствует о локальном характере загрязнения и разбавлении стоком.

Показатели вариации и распределения. Медианные значения указывают на устойчивое распределение большинства металлов, однако для Al и Fe отмечается определенная неоднородность. Стандартное отклонение оказалось низким для всех металлов и всех пунктов, что отражает постоянство их концентраций в течение четырех лет. Исключение составляет железо, для которого наблюдалось увеличение стандартного отклонения в сентябре 2024 г., а также в точке 4, что может свидетельствовать о кратковременном загрязнении.

При малых значениях дисперсии выборки концентрации металлов вдоль реки остаются стабильными. У Ва и Mn дисперсия была минимальной, что указывает на однородность концентраций по годам. Для Al низкие значения дисперсии характерны для пробы августа 2021 г., в то время как средняя дисперсия (август 2020 и ноябрь 2022 г.) отражает умеренные колебания без резких выбросов. Наибольшая дисперсия Al и Fe отмечена в мае и сентябре 2024 г., что может указывать на эпизодические выбросы загрязняющих веществ. Для Fe в ноябре 2022 г. дисперсия концентраций была выше, чем в остальные годы, где она оставалась низкой. Концентрации Sr характеризуются высокой дисперсией во все годы наблюдений.

По пространственным данным минимальная дисперсия Al, Fe, Ва и Mn наблюдалась в 10 точке, тогда как для Al и Fe во всех остальных точках она оставалась высокой. Для Sr особенно высокие значения дисперсии зафиксированы в точках 2 и 3, что, вероятно, связано с поступлением металлов из локальных источников.

Экссесс и характер распределения. Значения коэффициента эксцесса подтвердили наличие неоднородных распределений. Наибольшие значения эксцесса наблюдались в ноябре 2022 г. для Al, Fe и Sr, а также в феврале 2021 г. для Mn. По пунктам отбора наиболее высокие значения эксцесса отмечены: для Ва – в точке 6, Al – в точке 5, Fe – в точке 10, Mn – в точке 8, Sr – в точке 9. Высокие значения эксцесса указывают на редкие, но значительные превышения фоновых концентраций, что свидетельствует о локальных загрязнениях. Наименьшие значения эксцесса зафиксированы для Al и Fe в августе 2021 г., для Mn и Sr – в сентябре 2024 г. Минимальные показатели эксцесса по точкам наблюдались для Al, Mn и Sr в точке 1, Ва и Fe – в точке 3, что характеризует более равномерное распределение без выраженных пиков.

Интерпретация полученных данных. В 2024 г. в целом отмечено увеличение концентраций Fe, Mn и Sr, что может быть связано с возрастанием антропогенной нагрузки вблизи г. Нарын, при этом не исключается, что часть изменений могла быть обусловлена природными факторами. Населенный пункт, расположенный на левом берегу одноименной реки, насчитывает около 40 тыс. жителей. Неполное обеспечение централизованной системой водоснабжения и водоотведения создает прямые пути попадания сточных вод в природные водоемы, что негативно влияет на экологическую ситуацию и качество водных ресурсов. Это связано с использованием альтернативных способов утилизации отходов, неконтролируемым сбросом неочищенных стоков и ограниченной мощностью существующих очистных сооружений. Дополнительное влияние на концентрации металлов оказывает деятельность золоторудных месторождений «Макмал» и «Кумтор» [2].

Сравнение с результатами исследования С. Т. Оторовой [5], проведенного в 2002–2005 гг., показало снижение средних концентраций Al и Fe в 2020–2024 гг. (рис. 2). Для сопоставления использованы две аналогичные точки отбора (3 – выше г. Нарын, 4 – ниже г. Нарын). Более низкие концентрации в современный период могут быть обусловлены как природными изменениями гидрохимического режима, так и осаждением алюминия и железа при увеличении доли органических загрязнителей. Предположительно, эти процессы способствовали снижению содержания Al и Fe в водах Нарына в последние годы.

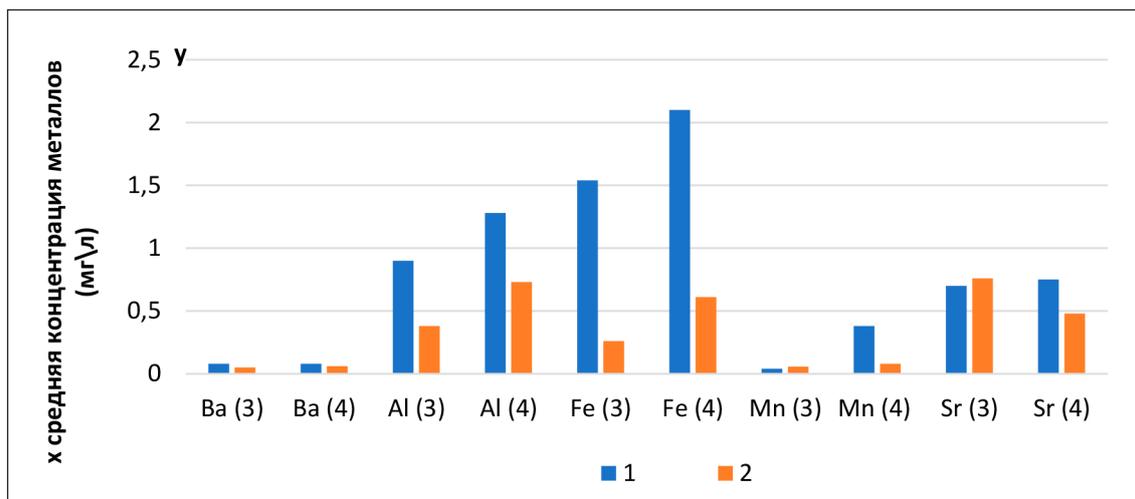


Рис. 2. Сравнение средних концентраций металлов в пунктах 3 (выше г. Нарын) и 4 (ниже г. Нарын) за 2002–2005 гг. (1 – синий цвет) и 2020–2024 гг. (2 – оранжевый цвет)
Примечание: составлен по результатам исследования авторов (2020–2024 гг.) и С. Т. Оторовой [5] (2002–2005 гг.).

Заклучение

На основе полученных данных по концентрациям пяти металлов в водах р. Нарын за 2020–2024 гг. был проведен анализ динамики их изменений. Результаты исследования показали, что в 2024 г. наблюдались наибольшие концентрации железа (Fe), марганца (Mn) и стронция (Sr). Основными потенциальными источниками поступления этих элементов могут являться антропогенные воздействия, связанные с деятельностью г. Нарын, а также горнодобывающих предприятий месторождений «Макмал» и «Кумтор». Одновременно нельзя полностью исключить влияние природных процессов на увеличение содержания металлов в воде. Сохранение текущих тенденций может привести к дальнейшему росту содержания указанных металлов, что представляет потенциальную угрозу для региона. Для оценки направленности изменений был проведен сравнительный анализ с результатами исследования С. Т. Оторовой, выполненного в 2002–2005 гг. Сопоставление средних концентраций в точках 3 и 4 показало, что уровни бария (Ba) и алюминия (Al) за прошедшие годы изменились незначительно, в то время как концентрации Fe, Mn и Sr ранее были значительно выше. Это может свидетельствовать о трансформации характера загрязнения – вероятно, увеличении доли органических соединений, связывающих металлы и влияющих на их подвижность. Тяжелые металлы в природных системах конкурируют за связывание с органическими лиганда-

ми, образуя координационные комплексы. Прочность комплексов зависит от свойств металлов, структуры лигандов и условий среды, а более сильные комплексообразователи вытесняют менее прочные, что влияет на подвижность и биодоступность металлов. В целом в течение исследуемого периода (2020–2024 гг.) концентрации большинства металлов оставались относительно стабильными, за исключением железа, для которого в сентябре 2024 г. было зафиксировано резкое увеличение в точке ниже г. Нарын. Аналогичные пики содержания алюминия, железа и стронция наблюдались в ноябре 2022 г. Однако, учитывая сезонные особенности водности р. Нарын (увеличение стока в летний период) происходит разбавление загрязняющих веществ вниз по течению, что способствует снижению их концентраций и частичному нивелированию локальных антропогенных воздействий. Полученные результаты исследования концентраций и распределения тяжелых металлов в р. Нарын могут быть использованы для совершенствования системы мониторинга качества воды, разработки рекомендаций по контролю над загрязнением и для оптимизации существующих технологий очистки сточных вод. Данные также могут применяться при планировании мероприятий по охране водных ресурсов и управлении антропогенной нагрузкой на речную экосистему. Таким образом, выявленные закономерности указывают на необходимость дальнейшего

мониторинга содержания металлов и комплексной оценки влияния промышленных и коммунальных источников на водную экосистему бассейна р. Нарын.

Список литературы

1. Каримов К. А., Алибаева Г. К. Временные вариации объема воды в Токтогульском водохранилище в связи со стоком реки Нарын // Институт физико-технических проблем и материаловедения НАН КР. 2021. С. 1–15. URL: <http://www.cawater-info.net/naryn/papers/karimov-alibaeva.pdf> (дата обращения: 15.02.2026).
2. Асанов Б. Д., Оторова С. Т., Тотубаева Н. Э., Кожобаев К. А. Оценка влияния антропогенных объектов на физические показатели воды реки Нарын // Успехи современного естествознания. 2021. № 6. С. 56–61. URL: <http://cawater-info.net/naryn/papers/asanov-et-al.pdf> (дата обращения: 14.02.2026).
3. Калашникова О. Ю., Аламанов С. К., Усубалиев Р. А. Оценка динамики компонентов стока рек ледникового питания в горах Тянь-Шаня в условиях изменения глобального климата // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2020. № 3. С. 8–13. URL: <http://cawater-info.net/naryn/papers/kalashnikova-et-al3.pdf> (дата обращения: 13.02.2026). DOI: 10.26104/NNNTIK.2019.45.557.
4. Назиркулова М. Б., Разикова И. Р. Оценка качества воды реки Нарын по интегральным показателям загрязнения. Экономика и социум. 2025. № 7 (134–1). С. 486–489. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-kachestva-vody-reki-naryn-po-integralnym-pokazatelyam-zagryazneniya> (дата обращения: 15.02.2026).
5. Оторова С. Т., Тотубаева Н. Э., Асанов Б. Д., Кожобаев К. А. Влияние города Нарын на некоторые показатели вод реки Нарын // Экология урбанизированных территорий. 2021. № 2. С. 33–39. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-goroda-naryn-na-nekotorye-pokazateli-vod-reki-naryn> (дата обращения: 15.02.2026). DOI: 10.24412/1816-1863-2021-2-33-39.
6. Маркин В. Н. Статистический анализ и стохастическое моделирование стока наносов. М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, 2015. С. 54–59. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/statisticheskiy-analiz-i-stokhasticheskoe-modelirovanie-stoka-nanosov> (дата обращения: 13.02.2026).
7. Дегембаева Н., Байбагышова Е., Бец Ф., Циффа Б., Лауэрман М., Аюпова Б. Пойменные территории вдоль реки Нарын в Кыргызстане: оценка гидрологических и климатических изменений и их динамика. Нарынский государственный университет имени С. Нааматова и Католический университет Айхштет-Ингольштадт. 2019. С. 16–26. [Электронный ресурс]. URL: <https://edoc.ku.de/id/eprint/25576/> (дата обращения: 15.02.2026).
8. Калашникова О. Ю. Методика прогнозирования водности рек Кыргызской Республики на основе WEAP (на примере р. Нарын) // Вестник КРСУ. 2024. Т. 24. № 8. С. 27–35. URL: <https://www.researchgate.net/profile/>

9. Мирошникова Е. П., Аринжанов А. Е. Тяжелые металлы в воде и донных отложениях Ириклинского водохранилища // Вестник Оренбургского государственного университета. 2016. № 6 (194). С. 70–73. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tyazhelye-metally-v-vode-i-donnyh-otlozheniyah-iriklinskogo-vodohranilisha> (дата обращения: 13.02.2026).
10. Атабиева Ф. А., Отарова А. С. Тяжелые металлы в воде малых рек Центрального Кавказа с преобладанием грунтового питания // Международный научный журнал «Инновационная наука». 2023. № 11–2. С. 186–190. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tyazhelye-metally-v-vode-malyh-rek-tsentralnogo-kavkaza-s-preobladaniem-gruntovogo-pitaniya> (дата обращения: 15.02.2026). ISSN 2410-6070.
11. Жаркова Н. Н., Баженова О. П., Болтовская А. С. Динамика содержания тяжелых металлов в воде реки Иртыш в период открытой воды в границах Омской области // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2025. Vol. 17. Is. 2. С. 98–123. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-soderzhaniya-tyazhelyh-metallov-v-vode-reki-irtysh-v-period-otkrytoy-vody-v-granitsah-omskoy-oblasti> (дата обращения: 22.02.2026). DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1109.
12. Сиделев С. И. Математические методы в биологии и экологии: введение в элементарную биометрию: учебное пособие. Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Демидова. Ярославль: ЯрГУ, 2012. 140 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://rucont.ru/efd/237893> (дата обращения: 12.02.2026). ISBN 978-5-8397-0859-4.
13. Ризниченко Г. Ю., Рубин А. Б. Математические методы в биологии и экологии. Биофизическая динамика продукционных процессов: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2025. 409 с. (Высшее образование). URL: <https://urait.ru/book/matematicheskie-metody-v-biologii-i-ekologii-biofizicheskaya-dinamika-produkcionnyh-processov-557337> (дата обращения: 13.02.2026). ISBN 978-5-534-19922-2.
14. Полякова В. В., Шаброва Н. В. Основы теории статистики: учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 148 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/34746/1/978-5-7996-1520-8.pdf> (дата обращения: 21.02.2026).
15. Чиркова О. А., Ляпкина Н. А. Общая теория статистики: Ч. 1: Учебное пособие по дисциплине «Статистика (теория статистики, социально-экономическая статистика)» для студентов всех форм обучения экономических направлений подготовки / Рубцовский индустриальный институт. Рубцовск, 2021. 84 с. [Электронный ресурс]. URL: https://edu.rubinst.ru/resources/books/Chirkova_O._A._Obschaya_teoriya_statistiki_Ch.1_UP_2021.pdf (дата обращения: 20.02.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

ОЧИСТКА ПРИРОДНОЙ ВОДЫ РЕКИ КАЗЫМ НА ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ ГОРОДА БЕЛОЯРСКИЙ

Качалова Г. С.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Российская Федерация,
e-mail: galinakachalova@mail.ru*

В целях модернизации технологического процесса подготовки воды р. Казым на водоочистных сооружениях г. Белоярский провели анализ природной воды и проанализировали несколько вариантов ее коагуляционно-флокуляционной очистки. Цель исследования – повысить степень очистки природной воды р. Казым посредством расчета эффективных порций вводимых разнотипных коагулянтов и флокулянтов, а также внедрения завершающей ступени сорбционной доочистки. В процессе научного эксперимента использованы современные методы: определения физических и химических показателей качества воды, определения мутности и содержания железа, метод динамической сорбции. Взяты перечисленные коагулянт и флокулянты: Аква-Аурат 30, флокулянты Praestol 2531 TR, Praestol 650 TR, Flopam 4115 SH, Flopam 4140 SH, полиакриламид-гель (ПАА), жидкое стекло ($\text{Na}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), сорбент марки КФГМ-7. Как итог серии экспериментов предлагается усовершенствованный вариант обработки воды с применением коагулянта и флокулянтов в эффективных количествах с внедрением завершающей ступени сорбционной доочистки на сорбенте КФГМ-7, резко уменьшающий уровень показателей мутности и концентраций железа в воде по сравнению с действующей технологией очистки в г. Белоярский ОАО «ЮКЭК-Белоярский».

Ключевые слова: природная вода, показатели качества воды, коагулянт, флокулянт, мутность, оптическая плотность, содержание железа, сорбция

PURIFICATION OF THE NATURAL WATER OF THE KAZYM RIVER AT THE SEWAGE TREATMENT PLANTS OF THE CITY OF BELOYARSK

Kachalova G. S.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Tyumen Industrial University”, Tyumen, Russian Federation,
e-mail: galinakachalova@mail.ru*

In order to modernize the technological process of water treatment of the Kazym River, the water treatment facilities of the city of Beloyarsky carried out an analysis of natural water and analyzed several options for coagulation-flocculation water purification. The purpose of the study is to increase the degree of purification of the natural water of the Kazym River by calculating the effective portions of different types of coagulants and flocculants, as well as by introducing the final stage of sorption post-treatment. Modern methods were used in the scientific experiment: determination of physical and chemical indicators of water quality, determination of turbidity and iron content, and the dynamic sorption method. The following coagulants and flocculants were used: Aqua Aurat-30, Praestol 2531 TR, Praestol 650 TR, Flopam 4115 SH, Flopam 4140 SH, polyacrylamide gel (PAA), liquid glass ($\text{Na}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), and KFGM-7 sorbent. As a result of a series of experiments, an improved version of water treatment using coagulants and flocculants in effective amounts is proposed, with the introduction of a final stage of sorption post-treatment using the KFGM-7 sorbent, which significantly reduces the level of turbidity and iron concentrations in water compared to the current treatment technology used by the YUKEK-Beloyarsky Open Joint-Stock Company in Beloyarsky.

Keywords: natural water, water quality indicators, coagulant, flocculant, turbidity, optical density, iron content, sorption

Введение

Город Белоярский является административным центром Белоярского района, расположенного на берегу р. Казым, впадающей в Обь. Отличительной чертой реки является короткое по длительности половодье, протекающее в мае и июне. После половодья река сильно мелеет, из-за этого вскрываются широкие песчаные косы, ближе к истокам. Река замерзает в середине осени, лед начинает свое движение лишь в конце весны. Судосходна до г. Белоярский.

В 1980-х гг. в связи с освоением нефтегазовых месторождений начал активно разви-

ваться г. Белоярский, в течение нескольких лет население города выросло до 20 тыс. чел. Одновременно с этим развивалась и система водоснабжения, по истечении 40 лет качество воды, подаваемой потребителям, ухудшилось, возникла необходимость проанализировать и принять новую схему водоочистки природной воды р. Казым с целью улучшения ее качества^{1,2}.

¹ Административный сайт города Белоярский. [Электронный ресурс]. URL: <https://admbelgor.ru/> (дата обращения: 20.09.2025).

² Казым. [Электронный ресурс]. URL: <https://catcher.fish/enciklopedia/vodoemy/urfo/kazy-m> (дата обращения: 20.09.2025).

Цель исследования – разработка рекомендаций для модернизации технологического процесса водоподготовки на водоочистных сооружениях г. Белоярский ОАО «ЮКЭК-Белоярский», в основу которых заложен расчет эффективных порций разнотипных коагулянтов и флокулянтов, а также внедрение завершающей ступени сорбционной доочистки.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в научно-исследовательской неаккредитованной лаборатории кафедры общей и специальной химии Тюменского индустриального университета. При выборе коагулянтов на основе анализа применяемых коагулянтов, по многим показателям лучшим оказался оксихлорид алюминия $Al_2(OH)_5Cl \cdot 6H_2O$ (ОХА) торговой марки «Аква-Аурат 30», с которым в дальнейшем проводился эксперимент. В настоящее время он является современным эффективным коагулянтом, применяемым для очистки и подготовки воды хозяйственно-питьевого назначения, а также очистки сточных вод. Основным действующим компонентом «Аква-Аурат 30» является полиоксихлорид алюминия (30 % по Al_2O_3), который гораздо более эффективен, чем сульфат алюминия, и, по сравнению с ним, обладает рядом преимуществ. Содержание остаточного алюминия после обработки вод ОХА значительно ниже, чем при использовании сульфата алюминия [1]. ОХА обладает низкой кислотностью и используется при большом диапазоне рН. Параметр рН воды при использовании оксихлорида алюминия не изменяется, что позволяет не применять дополнительные средства для ее нейтрализации. Высокая эффективность и, как следствие, низкий расход коагулянта (1 т «Аква-Аурат 30» по эффективности эквивалентна 4 т сульфата алюминия). Коагулянт готовился в виде растворов с концентрацией 5 %.

Для проведения анализа определены 6 наилучших флокулянтов для очистки природной воды [2–4]. Выбрали флокулянты различных типов: анионные, катионные, неионогенные. Флокулянты Praestol 2531 TR и жидкое стекло ($Na_2O \cdot mSiO_2 \cdot nH_2O$) относятся к анионным. Praestol 650 TR, Floпам 4115 SH, Floпам 4140 SH выступают в качестве катионных, полиакриламид-гель (ПАА) является неионогенным. Эффективность действия флокулянтов зависит от типа выбранного флокулянта [5, 6]. Флокулянты марки Praestol TR подходят

именно для обработки питьевых вод. Флокулянты готовились в виде растворов с концентрацией 0,1 %.

Сорбционная доочистка проводилась с загрузкой КФГМ-7, представляющего собой керамический, фильтрующий материал в виде гранул коричневого цвета, относящийся к композиционному типу [7–9].

Методы определения физических и химических показателей качества исходной воды: при отборе проб для анализа воды пользовались ГОСТ Р 59024-2020 [10]. При проведении первичного анализа воды на определение исходных показателей (цветность, прозрачность, запах, вкус, плотность, жесткость, рН, щелочность, окисляемость) были использованы методики: ГОСТ 31868-2012, РД 52.24.496-2018, ГОСТ 18995.1-73, ГОСТ 31954-2012, ПНД Ф 14.1:2:3:4.1, ГОСТ 31957-2012, ГОСТ Р 55684-2013.

Метод определения мутности: использовали спектрофотометрический метод согласно ГОСТ Р 57164-2016. Оптическую плотность вод измеряли на фотометре КФК-3-01- «ЗОМЗ» при длине волны падающего излучения 530 нм с кюветами с толщиной поглощающего свет слоя 50 мм [11]. Для перевода оптической плотности в мутность строили калибровочный график по стандартному образцу мутности (формазинная суспензия) ГСО 7271-96 [12].

Метод определения содержания железа в природной воде: содержание железа, а также приготовление растворов для анализа было выполнено согласно ПНД Ф 14.1:2.50-96 [13]. Оптическую плотность полученных растворов измеряли на спектрофотометре ПЭ-5400ВИ при фиолетовом светофильтре при длине волны 410 нм и кювете с толщиной оптического слоя 5 см. Массовую концентрацию общего железа находили по градуировочному графику на спектрофотометре ПЭ-5400ВИ.

Метод адсорбционной доочистки: процесс адсорбции проводили в динамике, в качестве сорбента использовали КФГМ-7. Для проведения исследования сорбционного процесса собрали установку, состоящую из адсорбционной колонки с адсорбентом, стаканчика для фильтрата. Опираясь на рекомендуемую, оптимальную скорость для фильтрования через сорбент КФГМ-7, равную 4 м/ч, для удобства проведения эксперимента установили скорость 3,3 м/ч. Высоту загрузки сорбента выбрали, исходя из минимально рекомендованной высоты 0,7 м. Пробы анализируемой воды объемом 60 мл заливали в колонку и фильтровали [14].

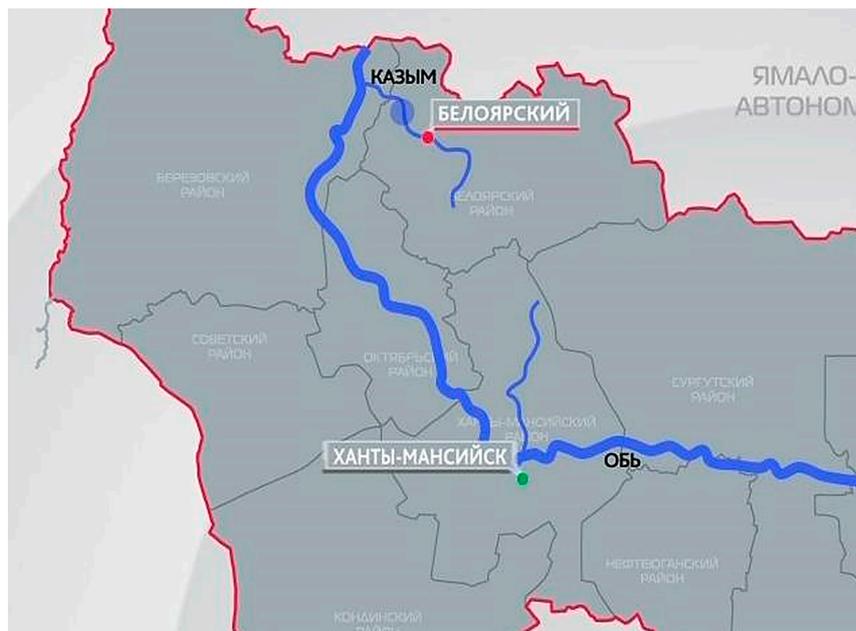


Рис. 1. Река Казым, северная река в ХМАО-Югре, правый приток Оби

Таблица 1

Исходные показатели качества исследуемой воды

Позиция	Цветность, град. шкала 2	Прозрачность, см	Запах, баллы	Вкус, баллы	Плотность, кг/м ³	Жесткость, ммоль/дм ³	pH	Щелочность, ммоль/дм ³	Окисляемость, мгО ₂ /дм ³	Мутность, ЕМФ
Река Казым	50	11	3	1	0,997	0,8	4,0	0,8	8,4	41,5

Примечание: составлена автором на основании полученных данных в ходе исследования.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты анализа исходных показателей качества природной воды р. Казым представлены в табл. 1.

Показатели качества исследуемой воды реки Казым в месте водозабора средние за год. Мутность по наблюдениям, как правило, была меньше 40,0 ЕМФ.

Эффективность действия различных доз коагулянта на снижение мутности природной воды показана в табл. 2. Эксперимент проводился в пяти различных дозировках. В 5 цилиндров объемом 250 мл наливали исследуемую воду р. Казым. При помощи пипетки отбирали необходимую дозировку коагулянта и добавляли к исследуемой воде. После перемешивания (25–35 с) по истечении 5 мин на протяжении 4,5 ч отбирали каждые 30 мин пробы для фиксирования

результатов по оптической плотности, которые затем были переведены в мутность.

В соответствии с СанПиН 1.2.3685-21 нормативный показатель мутности для питьевых вод не более 2,6 (3,5) ЕМФ [15]. Анализ полученных данных показал, что после коагуляции мутность воды превышает нормативный показатель, что говорит о необходимости использования флокулянтов.

Исследована эффективность действия различных доз флокулянтов на снижение показателя мутности воды, выявлены оптимальные дозы флокулянтов. Методика исследования процесса флокуляции аналогична методике исследования процесса коагуляции. На рис. 2 показано изменение оптической плотности воды (при длине волны падающего излучения 530 нм) в процессе флокуляции оптимальными дозами флокулянтов во времени.

Таблица 2

Эффективность действия различных доз коагулянта на снижение мутности природной воды

Дозировка коагулянта	Мутность после коагуляции, ЕМФ	Значение оптической плотности
Исходная	41,5	0,112
0,75 мл Аква-Аурат™30	7,4	0,020
1,25 мл Аква-Аурат™30	6,7	0,018
1,75 мл Аква-Аурат™30	8,1	0,022
2,25 мл Аква-Аурат™30	6,3	0,017
2,75 мл Аква-Аурат™30	7,0	0,019

Примечание: составлена автором на основании полученных данных в ходе исследования.

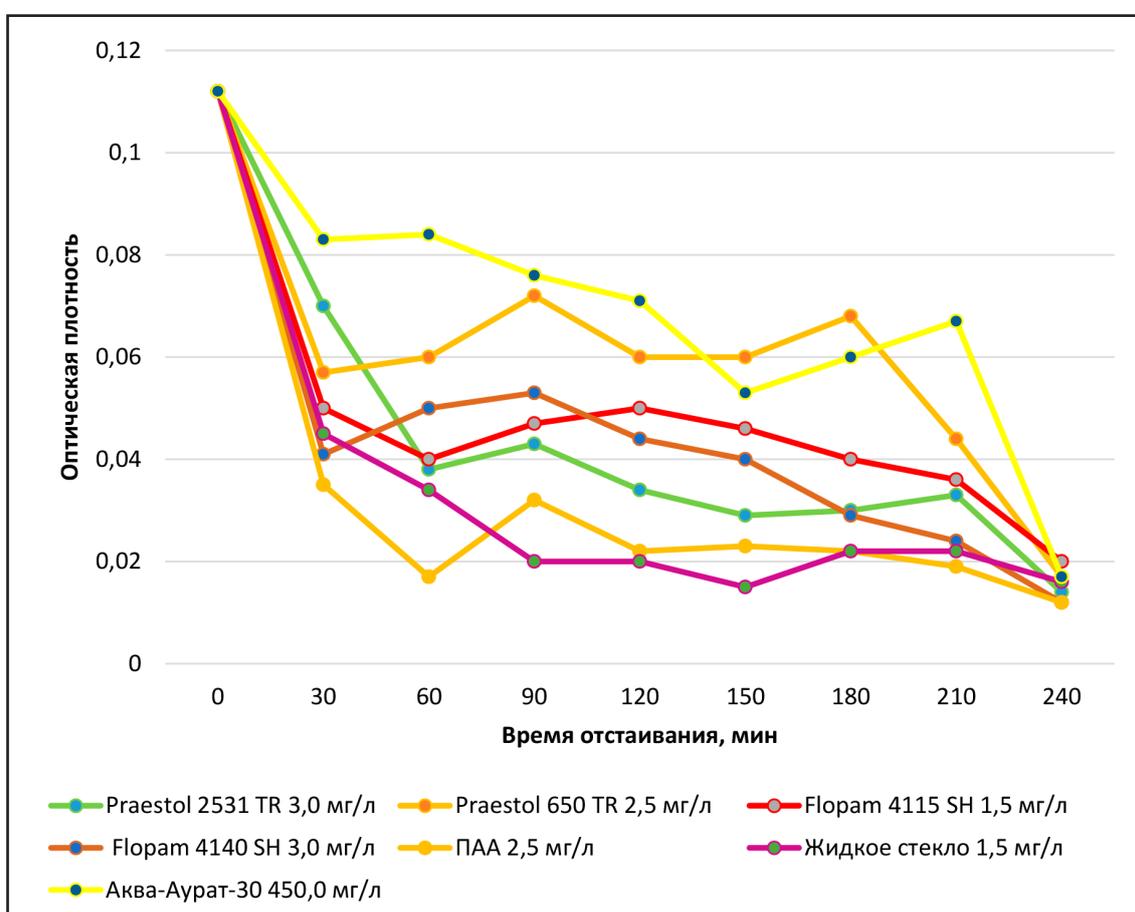


Рис. 2. Зависимость оптической плотности воды от времени отстаивания в присутствии различных флокулянтов в оптимальных дозах
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Величины оптической плотности и мутности при введении оптимальных доз коагулянта и флокулянтов приведены в табл. 3.

Как видно, минимальная мутность при использовании коагулирования с последу-

ющим флокулированием выше нормативного показателя мутности для питьевых вод в 1,7–2,8 раза, что обусловило необходимость использования процесса сорбционной доочистки природной воды.

Таблица 3

Значения оптической плотности и мутности воды при оптимальных дозах исследуемых коагулянта и флокулянтов

Реагенты	Дозировка, мг/л	Оптическая плотность*	Мутность, ЕМФ
Исходная	–	0,112	41,5
Аква-Аурат 30	450	0,017	6,3
Praestol 650 TR	2,5	0,017	6,3
Praestol 2531TR	3,0	0,014	5,2
Floram 4140 SH	3,0	0,012	4,4
Floram 4115 SH	1,5	0,020	7,4
Полиакриламид	2,5	0,012	4,4
Жидкое стекло	1,5	0,016	5,9

Примечание: составлена автором на основании полученных данных в ходе исследования.

*Оптическая плотность (ОП) – безразмерная величина.

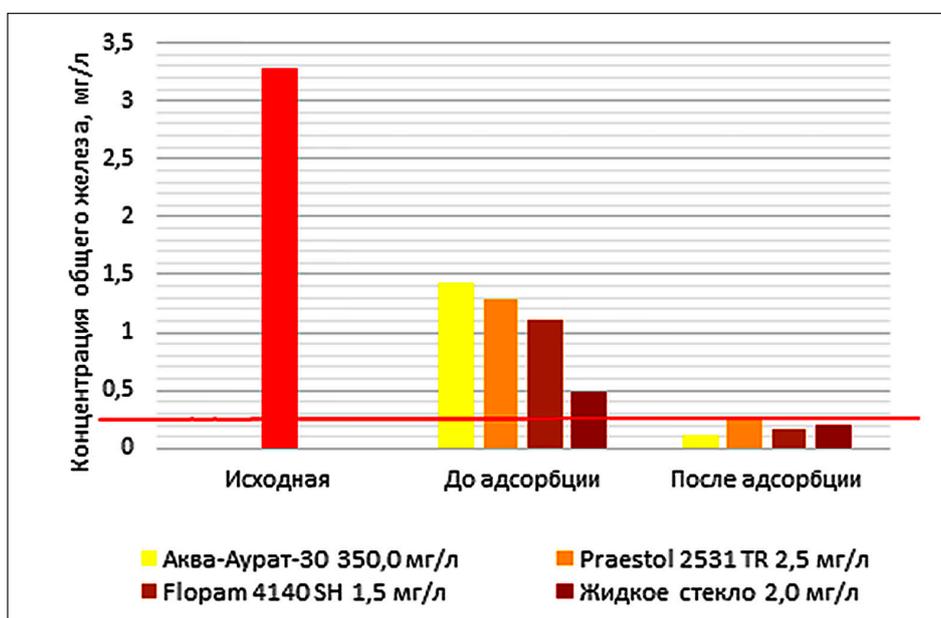


Рис. 3. Величины концентраций общего железа в пробах после коагуляционно-флокуляционной обработки до и после адсорбции
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Сорбционная доочистка воды является глубоким очищением с высокой эффективностью, цель достигается путем соединения на молекулярном уровне частиц химических веществ с примесями. Данным методом удаляются даже органические соединения, которые невозможно вывести другими способами.

Пробы воды пропускали через собранную установку, далее исследуемая вода проверялась на содержание общего железа и значениям мутности. На рис. 3 представлены концентрации общего железа в пробах, подвергшихся коагуляционно-флоку-

ляционной обработке до и после сорбции. Общее содержание железа в исходной воде 3,28 мг/л, что превышает нормативный показатель в 10 раз. По содержанию общего железа после адсорбции высокие результаты дали следующие реагенты: Аква-Аурат 30, Floram 4140 SH, Praestol 2531 TR, жидкое стекло. На рис. 3 отражена зависимость концентрации общего железа при использовании коагулянта Аква-Аурат 30, флокулянтов: Floram 4140 SH, Praestol 2531 TR, жидкое стекло в соответствующих дозировках до и после адсорбции.

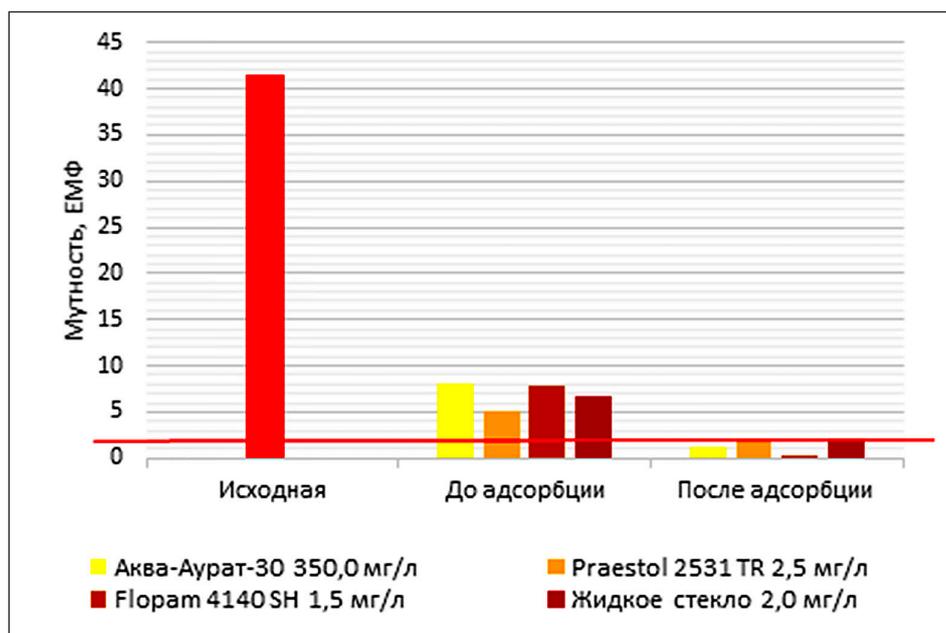


Рис. 4. Мутность воды после коагуляции-флокуляции до и после адсорбции
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Проведены исследования по влиянию сорбционной доочистки на мутность природной воды. Величины мутности в анализируемых пробах воды, после коагуляционно-флокуляционной обработки до и после адсорбции показаны на рис. 4.

По степени уменьшения мутности воды высшие результаты также показали следующие реагенты: Аква-Аурат 30 (350 мг/л), Floram 4140 SH (1,5 мг/л), Praestol 2531 TR (2,5 мг/л), жидкое стекло (2,0 мг/л) после коагуляционно-флокуляционной обработки с последующей сорбционной доочисткой.

Заключение

При действующем технологическом режиме в ОАО «ЮКЭК-Белоярский» вода, подаваемая потребителю после очистки, не соответствует требованиям ГОСТ Р 51232-98 по показателям мутности и общего железа. Опираясь на результаты исследования, рекомендуем в процессе водоподготовки воды для снабжения г. Белоярский следующие дозы коагулянта и флокулянтов: Аква Аурат 30 (350 мг/л); Praestol 2531 TR (2,5 мг/л); Floram 4140 SH (1,5 мг/л); жидкое стекло (2 мг/л), а также введение заключительной стадии фильтрования через адсорбент КФГМ-7. Рекомендуемые дозы были выбраны исходя из показателей концентрации общего железа и мутности после сорбционной доочистки. На выходе очищенная вода

по показателям мутности и общего железа соответствует существующим санитарным правилам и нормам.

Список литературы

1. Обзор рынка неорганических коагулянтов в России, ЕАЭС и мире / ООО «ИГ «ИНФОМАЙН». 4-е изд. М.: 2024, 141 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://infomine.ru/research/15/259> (дата обращения: 15.01.2026).
2. Бойкова Т. Е., Богданович Н. И., Мауричева Т. С. Применение флокулянтов в процессе водоподготовки // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2019. Т. 57. № 1. С. 91–101. URL: <https://snt-isuct.ru/article/view/1244> (дата обращения: 15.01.2026).
3. Jabbar K. Q., Barzinjy A. A., Hamad S. M. Iron oxide nanoparticles: Preparation methods, functions, adsorption and coagulation/flocculation in wastewater treatment // Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. 2022. Т. 17. С. 100661. DOI: 10.1016/j.enmm.2022.100661.
4. Zaharia C., Musteret C. P., Afrasinei M. A. The use of coagulation–flocculation for industrial colored wastewater treatment – (I) the application of hybrid materials // Applied Sciences. 2024. Т. 4. № 5. С. 2184. DOI: 10.3390/app14052184.
5. Ho Q. N. et al. Flocculation with heterogeneous composition in water environments: a review // Water Research. 2022. Т. 213. С. 118–147. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118147.
6. Ali W. et al. Effect of flocculation on turbidity currents // Frontiers in earth science. 2022. Т. 10. С. 1014–1170. DOI: 10.3389/feart.2022.1014170.
7. Тимофеев К., Акулич Л. Сорбционная доочистка карьерных и подотвалных вод на рудных предприятиях // Вода Magazine. 14.09.2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://termagazine.ru/nauchnye-stati2/novye-stati/24362-sorbtsionnaya-doochistka-karernykh-i-podotvalnykh-vod-na-rud-predpriyatiyakh.html> (дата обращения: 15.01.2026).
8. Юсубов Ф. В. Адсорбция тяжелых ионов металлов Cu{2+}, Zn{2+} и Ni{2+} из промышленной воды // Переходные технологии и материалы будущего: сборник статей IV Международной научно-технической конференции «Мин-

ские научные чтения – 2021» (Минск, 9 декабря 2021 г.). Минск: БГТУ, 2021. Т. 1. С. 364–368. [Электронный ресурс]. URL: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/44353> (дата обращения: 15.01.2026).

9. Мирзаева Е. И., Исаева Н. Ф., Ялгашев Э. Я., Турдиева Д. П., Боймонов Р. М. Получение адсорбентов для извлечения тяжелых металлов из сточных вод горнорудной промышленности // Горные науки и технологии. 2025. Т. 10. № 1. С. 45–55. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-02-224.

10. ГОСТ Р 59024-2020. Вода. Общие требования к отбору проб: разработан: Техническим комитетом ТК 343 совместно с Закрытым акционерным обществом «РОСА» (ЗАО «РОСА») 10 сентября 2020 г. М., 2020. 27 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200175475/titles> (дата обращения: 15.01.2026).

11. ГОСТ Р 57164-2016. Вода питьевая. Методы определения запаха, вкуса и мутности. М.: Стандартинформ, 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/In-dex2/1/4293751/4293751153.htm> (дата обращения: 15.01.2026).

12. Качалова Г. С. Выбор оптимального сочетания реагентов для очистки сточных вод аккумуляторного про-

изводства // Успехи современного естествознания. 2020. № 2. С. 54–59. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37331> (дата обращения: 15.01.2026). DOI: 10.17513/use.37331.

13. ПНД Ф 14.1:2.50-96. Методика выполнения измерений массовой концентрации общего железа в природных и сточных водах фотометрическим методом с сульфосалициловой кислотой от 20 марта 1995 г. 24 // Официальный интернет-портал правовой информации, 1996. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document> (дата обращения: 15.01.2026).

14. Kachalova G. S., Chuklin K. A. Sorption post-treatment of accumulator waste // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 962. Wales. 2020. P. 042081.

15. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Главный санитарный врач Российской Федерации. Постановление от 28 января 2021 г. № 2. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document> (дата обращения: 15.01.2026).

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 622.7:004.032.26
DOI 10.17513/USE.38481



**НЕЙРОННЫЕ СЕТИ В ЗАДАЧАХ ФЛОТАЦИИ
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ: СХЕМА ВЫБОРА АРХИТЕКТУРЫ
ПО ТИПУ ДАННЫХ И ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧИ**

**Александрова Т. Н. ORCID ID 0000-0002-3069-0001,
Гатиатуллин Б. Л. ORCID ID 0000-0001-6947-1909**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: s245069@stud.spmi.ru*

Статья посвящена применению методов искусственного интеллекта для решения задач анализа и управления процессами флотации. Актуальность исследования обусловлена сложностью флотации, как динамического процесса со множеством переменных, которые трудно формализовать с помощью классических математических моделей. Целью работы стало создание рекомендательной схемы для выбора архитектуры нейронной сети и типа слоев для задач моделирования и исследования флотационных процессов. Разработка рекомендательной схемы осуществлялась за счет анализа 115 научных публикаций в журналах, индексируемых в базах данных научной литературы ВАР, Scopus и Web of Science, среди которых 37 представлено в виде структурированного обзора в исследовании. При подробном рассмотрении источников показано, что одним из основных факторов, влияющих на тип слоев, используемых в сети, является тип исходных данных, в то время как характер решаемой задачи влияет непосредственно на тип используемой сети. Также отдельное внимание уделено интеграции априорной информации о системе через модификации сетей с физическим подкреплением. Отмечено, что включение дифференциальных уравнений масс-баланса и кинетики в алгоритм обучения позволяет значительно повысить точность предиктивных моделей и минимизировать потребность в объеме обучающих данных. По результатам произведенного анализа была разработана рекомендательная схема. Предложенная схема базируется на анализе природы входных данных и постановке целевой задачи. Для обработки табличных значений технологических датчиков обосновано применение полносвязных слоев; для анализа визуальных характеристик флотационной пены – сверточных сетей, а для учета временных зависимостей – рекуррентных схем. Разработанный подход систематизирует инструменты глубокого обучения для задач регрессии, классификации режимов и обработки изображений. В зависимости от наличия и вида дифференциальных уравнений, описывающих исследуемый процесс, в схеме предусмотрен выбор модификаций сетей с физическим подкреплением.

Ключевые слова: флотация, нейронные сети, цифровизация, обогащение, переработка полезных ископаемых

**NEURAL NETWORKS IN RAW MINERAL MATERIAL
FLOTATION TASKS: ARCHITECTURE SELECTION SCHEME
BASED ON DATA TYPE AND PROBLEM STATEMENT**

**Aleksandrova T. N. ORCID ID 0000-0002-3069-0001,
Gatiatullin B. L. ORCID ID 0000-0001-6947-1909**

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Empress Catherine II Saint Petersburg mining university”,
Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: s245069@stud.spmi.ru*

The article is devoted to the application of artificial intelligence methods for solving problems of analysis and control in flotation processes. The relevance of the study is driven by the complexity of flotation as a dynamic process involving numerous variables that are difficult to formalize using classical mathematical models. The objective of the work was to develop a recommendation framework for selecting neural network architectures and layer types for modeling and investigating flotation processes. The recommendation framework was developed through an analysis of 115 scientific publications in journals indexed in VAK, Scopus, and Web of Science databases, of which 37 are presented as a structured review in the study. A detailed examination of the sources demonstrates that one of the primary factors influencing the type of layers used in the network is the nature of the input data, while the characteristics of the task being solved directly affect the type of network employed. Particular attention is given to the integration of a priori system information through modifications of networks with physics-informed enhancements. It is noted that incorporating mass-balance and kinetic differential equations into the training algorithm significantly improves the accuracy of predictive models and reduces the required volume of training data. Based on the results of this analysis, the recommendation framework was developed. The proposed framework is grounded in an analysis of the nature of the input data and the formulation of the target task. For processing tabular values from technological sensors, the use of fully connected layers is justified; for analyzing visual characteristics of flotation froth, convolutional networks are recommended; and for accounting for temporal dependencies, recurrent schemes are advised. The developed approach systematizes deep learning tools for regression, regime classification, and image processing tasks. Depending on the presence and type of differential equations describing the process under study, the framework provides for the selection of physics-informed network modifications.

Keywords: flotation, neural networks, digitalization, enrichment, mineral processing

Введение

Флотация занимает центральное место среди методов обогащения полезных ископаемых благодаря своей универсальности и эффективности. Она применяется для разделения широкого спектра полезных ископаемых: от черных и цветных металлов до неметаллических и редкоземельных элементов [1–3]. Однако при своей широкой распространенности она остается сложным и до сих пор полностью не изученным процессом.

Сложность флотации с точки зрения управления и мониторинга определяется множеством факторов. Во-первых, она характеризуется высокой динамичностью: параметры флотационного процесса, такие как расход пульпы, концентрация реагентов, уровень, свойства сырья, непрерывно изменяются под влиянием различных факторов [4–6]. Во-вторых, взаимодействие между компонентами системы описывается сложными физико-химическими закономерностями, которые трудно формализовать аналитически в рамках обобщенной модели [7]. Данные факты делают флотацию трудным процессом с позиции математического описания, оптимизации и управления [8, 9].

В последние годы в мировом производстве в целом и в горной промышленности в частности активно идет цифровизация [10, 11]. Внедряются системы автоматизированного сбора и анализа технологических данных, разрабатываются алгоритмы машинного обучения для прогнозирования параметров процесса и оптимизации управления [12]. Цифровизация позволяет не только повысить точность контроля, но и сократить потери, снизить экономические затраты и оптимизировать потребление энергии, а также минимизировать влияние человеческого фактора [13].

В этом контексте особое внимание уделяется применению нейронных сетей и других методов искусственного интеллекта для анализа визуальных данных, прогнозирования технологических параметров и автоматического управления процессом флотации.

Однако в настоящее время активное развитие данной сферы привело к созданию большого количества различных типов сетей, что может осложнять подбор подходящей архитектуры, в особенности специалисту, для которого методы машинного обучения не являются основной специализацией. В связи с этим **цель исследования** – создание рекомендательной схемы, позволяющей

упростить выбор архитектуры на основании информации о решаемой задаче.

Материалы и методы исследования

Для достижения поставленной цели был проведен анализ научных публикаций на тему применения технологий глубокого обучения в процессах флотационного обогащения. В работе рассмотрены источники, индексируемые в базах данных ВАК, Scopus и Web of Science, а также материалы отечественных и зарубежных конференций, посвященных цифровизации обогатительных процессов.

Методологическая основа исследования опирается на принципы системного и междисциплинарного анализа. В качестве основного инструмента в работе использован структурированный обзор научных публикаций. Из предварительно отобранных 115 источников в исследовании непосредственно представлены 37. Ввиду активного развития сферы глубокого обучения, возраст большинства источников ограничен пятью годами для обеспечения соответствия добавляемых в схему элементов актуальным разработкам в данной области. Тематика источников включала использование нейронных сетей: как компонентов измерительных средств и систем мониторинга; в качестве сенсоров; как инструментов для оптимизации с использованием моделирования и управления процессом на основе прогностического моделирования. Также дополнительно были изучены источники, в которых раскрываются особенности структурных элементов и архитектурных решений нейросетевых моделей.

Результаты исследования и их обсуждение

Классификация слоев нейронной сети, в зависимости от типа входных данных

Нейронные сети представляют собой мощный инструмент для обработки и анализа данных в задачах, связанных с процессами флотации. Одним из ключевых преимуществ нейронных сетей является их способность работать с разнообразными форматами входных данных: изображениями, временными рядами, табличными данными, спектрами и другими типами информации. Благодаря своей универсальности и гибкости, нейронные сети становятся основой современных систем цифровизации и автоматизации в горной отрасли.

Входные данные для нейронных сетей могут иметь различную природу – числовую, временную, визуальную или смешанную, – и именно их структура во многом определяет выбор архитектуры модели и метод предварительной обработки. Наиболее распространенными в практике флотационного обогащения являются табличные данные и временные ряды, получаемые с датчиков технологического оборудования.

Особое место занимают визуальные данные, например изображения флотационной пены. Для их анализа применяются сверточные нейронные сети, способные выделять пространственные закономерности, такие как распределение пузырьков, текстура и интенсивность бликов, цветовые характеристики пены [14]. Эти признаки не могут быть напрямую измерены классическими датчиками, но содержат ценную информацию о режиме работы процесса.

В отдельный сегмент числовых данных можно выделить временные ряды, где данные связаны с историей изменений параметров. Для их обработки используют рекуррентные нейронные сети, учитывающие зависимость текущего состояния от предыдущих значений. Для работы с временными рядами разработаны различные модификации базовой рекуррентной сети, такие как GRU, LSTM, позволяющие производить фильтрацию исторических значений, сохраняя во внутренней памяти важную информацию и игнорируя ненужную, при этом значительно увеличивая качество прогноза [15–17].

*Архитектура нейронной сети
в зависимости от решаемой задачи*

Регрессионные модели нейронных сетей используются для прогнозирования количественных параметров технологического процесса на основе входных данных различной природы. В контексте флотации такие модели позволяют оценивать будущие значения извлечения, содержания ценных компонентов в концентрате, расхода реагентов или других показателей эффективности. В отличие от классических методов регрессии, нейронные сети способны учитывать сложные нелинейные зависимости между множеством факторов, что позволяет использовать их в качестве так называемых soft-сенсоров, позволяющих вести косвенные измерения параметров, которые не могут быть измерены напрямую, на основе корреляционных зависимостей [18].

Так, нейросетевая архитектура, разработанная для мониторинга производительности

флотации в реальном времени, показала способность к устойчивому прогнозированию параметров процесса с высокой точностью [19]. Также на примере углей было показано, что интеграция в качестве исходных данных результатов рентгенофлуоресцентного анализа позволяет повысить точность прогнозирования зольности [20].

Другим примером успешного применения нейронных сетей может служить разработка алгоритма автоматизированного машинного обучения, примененная к данным с обогатительной фабрики [21]. Разработка продемонстрировала ошибку прогнозирования менее 3 % для основных ценных компонентов.

Полезное с точки зрения кинетического описания флотации использование нейронных сетей заключается в прогнозировании параметров, необходимых в модели. Например, нейронная сеть позволяет связать режимные параметры аэрации флотомашины, а также группу гидродинамических критериев подобия с вероятностью столкновения частиц с пузырьком, а также значением извлечения [22].

Для повышения точности прогнозирования также возможно использование в качестве входных данных не просто различных технологических переменных, а их временных рядов, что может быть реализовано с помощью рекуррентных моделей [23].

Классификационные модели нейронных сетей применяются для распознавания и отнесения технологических состояний процесса флотации к определенным категориям. Они позволяют автоматически выявлять режимы работы оборудования, например нормальный ход процесса, начало перегрузки, избыток пены или недостаток реагентов. В отличие от регрессионных моделей, которые предсказывают численные значения, классификационные модели выдают дискретные метки, что упрощает их интерпретацию операторами. Использование таких систем помогает быстрее реагировать на отклонения и предотвращать аварийные или неэффективные режимы.

Показательным примером является работа, где предложен сенсор для классификации сортности хвостов флотации железной руды по изображениям пены на основе гибридной глубокой нейронной сети [24]. Экспериментальные результаты показали высокую точность распознавания и устойчивость модели к вариациям условий съемки, что подтверждает возможность использования таких классификационных сетей.

Сети для распознавания образов занимают особое место среди нейронных моделей, применяемых в анализе флотационных процессов, поскольку они позволяют получать информацию напрямую из визуальных данных. Такие сети, чаще всего построенные на основе сверточной архитектуры, используются для обработки изображений пенной поверхности, анализа ее текстуры, цвета, размера и формы пузырьков [25]. Они могут как решать самостоятельные задачи, такие как обнаружение объектов или семантическая сегментация [26], так и служить основой для задач регрессии и классификации, извлекая признаки для прогнозирования извлечения или определения режимов работы.

Например, сверточная модель, обученная на изображениях, снятых веб-камерой у зоны разгрузки промышленной флотационной камеры, может быть использована для классификации подвижности пены на категории с точностью 98 % [27]. В качестве признака для классификации данная модель использует степень размытости изображения, получаемые прогнозные классы могут служить индикатором стабильной работы флотационной машины в реальных условиях.

Для регрессионных задач на видеоданных эффективны гибридные архитектуры. Например те, что сочетают сверточные и рекуррентные LSTM-модули для быстрого определения зольности концентрата угольной флотации по изображениям пены, обеспечивая высокую точность даже при ограниченных данных, что было показано на примере оценки зольности концентрата при флотации угля [28].

Отдельно стоит выделить эксперименты по использованию нейронных сетей для обнаружения объектов и сегментации. Так, например, использование нейронной сети позволяет снизить на 5,1 % количество пропущенных проходов пеногона по сравнению с классическими алгоритмами компьютерного зрения [29].

Множество работ посвящено оценке размера пузырьков на поверхности пенного слоя, при этом в большей части работ используются сети для сегментации, позволяющие эффективно выделять и анализировать контуры пузырьков, что может быть использовано в качестве исходных данных для моделирования [30, 31].

Нейронные сети с физическим подкреплением

Нейронные сети с физическим подкреплением представляют собой класс гибридных моделей, в которых обучение опирается

не только на данные, но и на заранее известные физические закономерности процесса. В контексте флотации это могут быть уравнения гидродинамики, законы массопереноса, кинетика флотации, что позволяет ограничить пространство допустимых решений и исключить физически нереалистичные прогнозы, при этом снижая требования к объему обучающих данных.

В таких моделях физические ограничения и связи могут вводиться непосредственно, через модификацию структуры сети, как это сделано в операторных сетях и их модификациях, за счет разделения сети на блоки, ответственные за изучение и описание аналогов математических операторов [32, 33]. Либо путем введения дополнительных компонентов в функцию потерь, напрямую влияющую на процесс изучения закономерностей, как это сделано в случае с архитектурой PINN, где прогнозные значения помимо соответствия экспериментальным данным должны подчиняться зависимостям, описываемым дифференциальными уравнениями [34].

Так, например, можно интегрировать в модель технологической схемы флотационного обогащения уравнения масс-баланса в дифференциальной форме, что позволяет снизить ошибку прогнозных данных [35]. Аналогичным образом можно осуществить интеграцию в нейронную сеть математических моделей оборудования.

В случае, если имеется модель процесса в форме обыкновенного дифференциального уравнения, она может быть описана особой формой рекуррентной сети Neural ODE, по своему принципу работы напоминающей численную схему интегрирования Эйлера, что может быть успешно применено для моделирования кинетики флотации [36].

Отдельно стоит выделить ветку операторных сетей, способных эффективно прогнозировать нестационарные скалярные и векторные поля, например гидродинамику в камере флотомашин, играющую важную роль в формировании пузырьков, контакте между пузырьками и частицами и др.

Так, показано, что операторные сети могут успешно применяться в качестве моделей для вычислительной гидродинамики [37]. Указанные модели могут использоваться для оперативного прогнозирования гидродинамических условий в зависимости от работы параметров работы аппарата и геометрических характеристик узла импеллер-статор, что может быть полезно как на этапе проектирования оборудования, так и на этапе управления им.

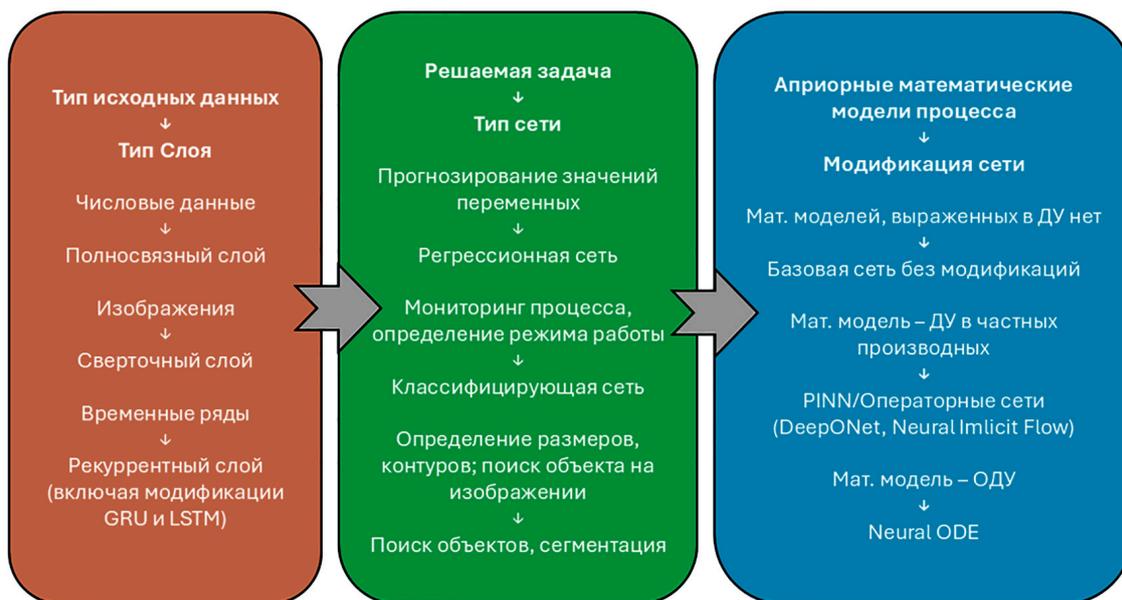


Схема выбора элементов архитектуры нейронной сети
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Рекомендательная схема по выбору слоев и архитектуры нейронной сети

Анализ рассмотренных выше типов нейронных сетей показывает, что выбор оптимальной архитектуры определяется двумя ключевыми факторами: природой входных данных и характером решаемой задачи. На основе систематизированной информации была составлена схема для подбора архитектурных решений, представленная на рисунке.

Для табличных данных, содержащих измерения датчиков и технологические параметры, предпочтительны полносвязные сети, которые непосредственно обрабатывают векторные представления. Для временных рядов необходимы рекуррентные архитектуры, способные воспринимать временные зависимости и динамику процесса. Визуальные данные требуют сверточных сетей, обеспечивающих эффективное извлечение пространственных признаков. В случае наличия какой-либо априорной информации о системе в форме дифференциального уравнения, можно говорить о возможности применения специальных модификаций с физическим подкреплением.

На основании этой схемы можно принимать решения по выбору архитектуры нейросетевой модели. Например, если целью исследования является разработка кинетической модели флотации, то рационально будет выбрать рекуррентные слои для по-

строения регрессионной модели, так как исходные данные представляют собой связанную последовательность, а в конечном счете требуется спрогнозировать числовое значение. Модель кинетики флотации в данном случае является основанием для использования физически подкрепленной архитектуры NeuralODE. Если же в качестве входных данных используется видеосигнал, по сути являющийся временным рядом из кадров, можно использовать сверточную нейросеть в комбинации с LSTM слоями.

Аналогичным образом можно осуществлять выбор структуры сети для любой иной задачи, которую предполагается решать с помощью нейронных сетей. Необходимо определить тип входных данных, который будет использовать сеть, конечную задачу сети, а также проверить возможность введения физических ограничений на основании существующих математических моделей.

Выводы

В результате систематизации литературных источников, произведенной в этой работе, были достигнуты следующие результаты:

1. Установлено, что выбор слоев и архитектуры нейронной сети для задач флотационного обогащения определяется природой входных данных и характером решаемой задачи. Для табличных данных, как правило, используются полносвязные слои, для вре-

менных рядов – рекуррентные, а для изображений – сверточные сети.

2. Отмечено, что возможность применения физически подкрепленной модификации зависит от наличия априорных знаний о процессе, представленных в виде дифференциальных уравнений или физических закономерностей. Применение данной архитектуры позволяет как снизить ошибку прогнозирования, так и уменьшить потребность в большом объеме обучающих данных.

3. Разработана схема, позволяющая осуществлять выбор структурных элементов слоев нейронной сети и архитектуры на основании исходных данных к разработанной модели.

Список литературы

1. Матвеева Т. Н., Громова Н. К., Ланцова Л. Б. Перспективные реагенты для извлечения стратегических металлов из труднообогатимого минерального сырья // Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 757–764. EDN: XAAEGH.
2. Митрофанова Г. В., Черноусенко Е. В., Компанченко А. А., Калугин А. И. Особенности действия реагента-собирающего из класса алкиловых эфиров фосфорной кислоты при флотации апатит-нефелиновых руд // Записки Горного института. 2024. Т. 268. С. 637–645. EDN: CSNOVO.
3. Иваник С. А., Илюхин Д. А. Флотационное выделение элементарной серы из золотосодержащих кеков // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 202–208. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.202.
4. Афанасова А. В., Абурова В. А., Прохорова Е. О., Лушина Е. А. Исследование влияния депрессоров на флотоактивные породообразующие минералы при флотации сульфидных золотосодержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6 (2). С. 161–174. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_161.
5. Кондратьев С. А., Хамзина Т. А. Оценка собирающей активности физически сорбируемых реагентов на примере легкофлотируемого шлама коксующихся углей // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 549–559. DOI: 10.31897/PMI.2022.52.
6. Князькин Е. А., Клебанов Д. А., Ювакаев Р. О. Разработка и применение новых методов оценки изменчивости качества полезных ископаемых на основе анализа больших данных для оперативного управления рудопотоком на горных предприятиях // Записки Горного института. 2025. Т. 275. С. 145–154. EDN: NBNXHX.
7. Александрова Т. Н., Кузнецов В. В. Подход к определению удельной интенсивности аэрации при флотации // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. № 5. С. 125–136. DOI: 10.15372/FTPRPI20220512.
8. Heng Y., Zengxian G. Flotation Process Measurement and Control. The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy. In: Kuangdi, X. (eds). Singapore: Springer. 2024. DOI: 10.1007/978-981-99-2086-0_820.
9. Le Roux J. D., Craig I. K. State controllability of a froth flotation cell // IFAC-PapersOnLine. 2019. Vol. 52. Is. 14. P. 54–59. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.09.163.
10. Маховиков А. Б., Филясова Ю. А. Цифровые технологии при добыче твердых полезных ископаемых в Арктике // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16. № 3 (61). С. 1110–1117. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1110-1117.
11. Koteleva N., Khokhlov S., Frenkel I. Digitalization in open-pit mining: A new approach in monitoring and control of rock fragmentation // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Is. 22. P. 10848. DOI: 10.3390/app112210848.
12. Яковлева Т. А., Ромашев А. О., Машевский Г. Н. Оптимизация дозирования флотационных реагентов при флотации руд цветных металлов с применением цифровых технологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6 (2). С. 175–188. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_175.
13. Жуковский Ю. Л., Сусликов П. К. Идентификация и классификация электрической нагрузки горных предприятий на основе методов декомпозиции сигналов // Записки Горного института. 2025. Т. 275. С. 5–17. EDN: HPZAGK.
14. Alzubaidi L., Zhang J., Humaidi A. J., Al-Dujaili A., Duan Y., Al-Shamma O., Santamaria J., Fadhel M. A., Al-Amidie M., Farhan L. Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions // J. Big Data. 2021. Vol. 8. Is. 1. DOI: 10.1186/s40537-021-00444-8.
15. Wenjin Xu, Qinshan Liu, Shiqi Dai, Jincheng Liu, Shixiang Li, Yaowen Xing, Xiahui Gui. Machine learning-based prediction of multivariate condition flotation kinetics // Powder Technology. 2026. Vol. 470. P. 122007. DOI: 10.1016/j.powtec.2025.122007.
16. Yaoyi Cai, Shiwen Li, Zekai Yao, Tian Li, Qingya Wang. Online detection of concentrate grade in the antimony flotation process based on in situ Raman spectroscopy combined with a CNN-GRU hybrid model // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2025. Vol. 301. P. 122909. DOI: 10.1016/j.saa.2023.122909.
17. Ławryńczuk M., Zarzycki K. LSTM and GRU type recurrent neural networks in model predictive control: A Review // Neurocomputing. 2025. Vol. 632. P. 129712. DOI: 10.1016/j.neucom.2025.129712.
18. Yuri A. W. Shardt, Kevin Brooks, Xu Yang, Sanghong Kim. Advanced Soft-Sensor Systems for Process Monitoring, Control, Optimisation, and Fault Diagnosis // IFAC-PapersOnLine. 2023. Vol. 56. Is. 2. P. 11768–11777.
19. Zhang H., Tang Z., Xie Y., Chen Q., Gao X., Gui W. Feature Reconstruction-Regression Network: A Light-Weight Deep Neural Network for Performance Monitoring in the Froth Flotation // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2021. Vol. 17. Is. 12. P. 8406–8417.
20. Хуан Ц., Ли Ч., Чэнь Б., Цуй С., Лу Ч., Дай В., Чжао Ю., Дуань Ч., Дон Л. Оперативный контроль элементного состава угольной золы на основе машинного обучения и рентгеновской флуоресценции // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 663–676. DOI: 10.31897/PMI.2022.89.
21. Edwin J., Koh Y., Amini E., Gaur S., Maquieira M. B., Heck C. J., McLachlan G. J., Beaton N. An Automated Machine learning (AutoML) approach to regression models in minerals processing with case studies of developing industrial comminution and flotation models // Minerals Engineering. 2022. Vol. 189. P. 107886.
22. Chelgani S. C., Shahbazi B., Rezai B. Estimation of froth flotation recovery and collision probability based on operational parameters using an artificial neural network // International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials. 2010. Vol. 17. Is. 5. P. 526–534. DOI: 10.1007/s12613-010-0353-1.
23. Wang K., Pang L., Li X., Zhao X. An improved RNN modeling algorithm for flotation process of copper-silver ore // Proceedings of the 34th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2022. 2022. P. 5232–5237. DOI: 10.1109/CCDC55256.2022.10034059.
24. Zhang D., Gao X. Soft sensor of flotation froth grade classification based on hybrid deep neural network // International Journal of Production Research. 2021. Vol. 59. Is. 16. P. 4794–4810. DOI: 10.1080/00207543.2021.1894366.
25. Aldrich C., Avelar E., Liu X. Recent advances in flotation froth image analysis // Minerals Engineering. 2022. Vol. 188. P. 107823. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107823.
26. Li H., Xie, F., Zhou J., Liu J. Object Detection, Segmentation and Categorization in Artificial Intelligence // Electronics. 2024. Vol. 13. Is. 13. P. 2650. DOI: 10.3390/electronics13132650.

27. Park H., Bai C., Wang L. A Convolutional Neural Network for Classification of Froth Mobility in an Industrial Flotation Cell // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2023. Vol. 44. Is. 3. P. 209–217. DOI: 10.1080/08827508.2022.2042281.
28. Yang X., Zhang K., Ni C., Cao H., Xie J., Tan Z., Yu H. Ash determination of coal flotation concentrate by analyzing froth image using a novel hybrid model based on deep learning algorithms and attention mechanism // *Energy*. 2022. Vol. 260. P. 125027. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125027.
29. Загонский А. В., Кузнецов С. В., Саломатова К. А. Улучшение качества распознавания параметров флотомашины с использованием нейронной сети // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025. № 6. С. 153–167. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_6_0_153.
30. Nizovtseva I., Mikushin P., Starodumov I., Makhaeva K., Kraev S., Chernushkin, D. Bubble Detection in Multiphase Flows Through Computer Vision and Deep Learning for Applied Modeling // *Mathematics*. 2024. Vol. 12. Is. 23. P. 3864. DOI: 10.3390/math12233864.
31. Zhang L., Xu D. Flotation bubble size distribution detection based on semantic segmentation // *IFAC-PapersOnLine*. 2020. Vol. 53. Is. 2. P. 11842–11847. DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.696.
32. Pan S., Brunton S. L., Kutz J. N. Neural Implicit Flow: a mesh-agnostic dimensionality reduction paradigm of spatio-temporal data // *Journal of Machine Learning Research*. 2022. Vol. 24. Is. 1. DOI: 10.48550/arXiv.2204.03216.
33. Lu L., Jin P., Pang G., Zhang Z., Karniadakis G. DeepONet: Learning nonlinear operators for identifying differential equations based on the universal approximation theorem of operators // *Nature Machine Intelligence*. 2020. Vol. 3. Is. 3. P. 218–229. DOI: 10.1038/s42256-021-00302-5.
34. Luo K., Zhao J., Wang Y., Li J., Wen J., Liang J., Soekmadji H., Liao S. Physics-informed neural networks for PDE problems: a comprehensive review // *Artificial Intelligence Review*. 2025. Vol. 58. Is. 10. P. 323. DOI: 10.1007/s10462-025-11322-7.
35. Nasiri M., Iqbal S., Särkkä S. Physics-informed machine learning for grade prediction in froth flotation // *Minerals Engineering*. 2025. Vol. 227. P. 109297. DOI: 10.48550/arXiv.2408.15267.
36. Chen R. T. Q., Rubanova Y., Bettencourt J., Duvenaud D. Neural Ordinary Differential Equations // *NIPS*. 2018. Vol. 109. P. 31–60. DOI: 10.48550/arXiv.1806.07366.
37. De Vito L., Pinnau N., Dey S. Implicit Neural Representation For Accurate CFD Flow Field Prediction. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2408.06486.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания «Исследование термодинамических процессов Земли с позиции генезиса углеводородов на больших глубинах», FSRW-2024-0008».

Financing: “This research was funded by government assignment “Study of thermodynamic processes of the Earth from the position of hydrocarbon genesis at great depths” FSRW-2024-0008”.

СТАТЬЯ

УДК 528.02:528.2/.5:528.7
DOI 10.17513/USE.38482



CC BY 4.0

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГЕОПРИВЯЗКИ СНИМКОВ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ АЭРОФОТОСЪЕМКИ БАЗОВЫМИ СТАНЦИЯМИ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Насередин Х. Х. ORCID ID 0009-0001-1806-7831, Акель М. А.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет геодезии и картографии», Москва,
Российская Федерация, e-mail: geo-gis25@mail.ru*

Последнее десятилетие характеризуется быстрым развитием технологий аэрофотосъемки и 3D-моделирования благодаря совершенствованию беспилотных летательных аппаратов и программного обеспечения фотограмметрической обработки. Ортофотопланы являются ключевым продуктом этих технологий, обеспечивая точное корректное представление земной поверхности. Основная цель данного исследования заключается в разработке методики повышения точности координатной привязки аэрофотоснимков, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов, при которой преодолевается ограничение, связанное с необходимостью использования традиционных наземных опорных точек. Данная методика основывается на использовании информации, поступающей от локальных сетей постоянных станций глобальной навигационной спутниковой системы. Цель – разработка и апробация комплексной методики получения высокоточных ортофотопланов с использованием беспилотных летательных аппаратов Autel Evo II Pro 6K и программного обеспечения Agisoft Metashape, включая оценку точности при использовании дифференциальной GNSS-коррекции (ППК). Методика включает три этапа: первый – планирование и подготовка (оценка метеословий, нормативно-правовые аспекты, проектирование миссии), второй – полевые работы (аэрофотосъемка с использованием наземных опорных точек и дифференциальной GNSS-системы), третий и последний – камеральная обработка (обработка GNSS-данных в GeoBox Office и RTKLIB, фотограмметрическая обработка в Agisoft Metashape). В результате получены ортофотопланы масштаба 1:500 с горизонтальной точностью около 2 см. Анализ точности с использованием PPK-коррекции от ближайшей базовой станции показал среднюю квадратическую ошибку = 10,97 см. При использовании удаленных базовых станций CORS (до 76 км) точность оставалась на сопоставимом уровне (12,269 см). Визуальная и количественная верификация подтвердили пригодность результатов для инженерно-топографических работ. Разработанная методика демонстрирует эффективность комплекса беспилотных летательных аппаратов Autel Evo II Pro 6K и ПО Agisoft Metashape для создания высококачественных геопространственных продуктов. Методика может быть применена в кадастровых работах, инженерных изысканиях, сельском хозяйстве и экологическом мониторинге.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, аэрофотосъемка, фотограмметрия, Agisoft Metashape, ортофотоплан, цифровая модель местности, Post-Processing Kinematic (PPK), опорные точки

Благодарности: Авторы выражают благодарность Шайхилу Исламу Бургановичу, доктору технических наук, директору ООО «Картография».

IMPROVING THE ACCURACY OF GEO-TAGGING AERIAL PHOTOGRAPHS FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES USING GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM BASE STATIONS

Nasereddin Kh. Kh. ORCID ID 0009-0001-1806-7831, Akel M. A.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Moscow State University of Geodesy and Cartography”,
Moscow, Russian Federation, e-mail: geo-gis25@mail.ru*

The last decade has been characterized by the rapid development of aerial photography and 3D modeling technologies, thanks to improvements in unmanned aerial vehicles (UAVs) and photogrammetric processing software. Orthophotoplans (orthophoto maps) are a key product of these technologies, providing an accurate and correct representation of the Earth's surface. The primary aim of this research is to develop a method for improving the coordinate accuracy of aerial photographs obtained using UAVs, which overcomes the limitation associated with the need for traditional ground control points (GCPs). This method is based on using information from local networks of permanent Global Navigation Satellite System (GNSS) reference stations. The objective is the development and testing of a comprehensive methodology for obtaining high-precision orthophoto maps using Autel Evo II Pro 6K UAVs and Agisoft Metashape software, including an accuracy assessment when using differential GNSS correction (Post-Processed Kinematic – PPK). The methodology includes three stages: the first is planning and preparation (assessment of weather conditions, regulatory aspects, mission design); the second stage is fieldwork (aerial photography using ground control points and a differential GNSS system); and the third and final stage is office processing (processing of GNSS data in GeoBox Office and RTKLIB, photogrammetric processing in Agisoft Metashape). The results yielded orthophoto maps at a scale of 1:500 with a horizontal accuracy of approximately

2 cm. Accuracy analysis using PPK correction from a nearby base station showed a root mean square error (RMSE) = 10.97 cm. When using remote CORS base stations (up to 76 km away), the accuracy remained at a comparable level (12.269 cm). Visual and quantitative verification confirmed the suitability of the results for engineering and topographic work. Conclusions: The developed methodology demonstrates the effectiveness of the Autel Evo II Pro 6K UAV and Agisoft Metashape software complex for creating high-quality geospatial products. The methodology can be applied in cadastral work, engineering surveys, agriculture, and environmental monitoring.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicles, aerial survey, photogrammetry, Agisoft Metashape, orthomosaic, Digital Terrain Model (DTM), Post-Processing Kinematic (PPK), Ground Control Points (GCPs)

Acknowledgements: The authors would like to thank Shaikhil Islam Burganovich, Doctor of Technical Sciences, Director of Cartography LLC.

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) прочно закрепились в современных геодезических, картографических и инженерных изысканиях [1]. Возможность быстрого получения пространственных данных высокого разрешения при минимальных затратах делает дроны незаменимым инструментом для решения широкого спектра прикладных задач [2, 3].

Одним из ключевых методов является топографическая съемка с использованием цифровой фотограмметрии. Эта техника позволяет создавать подробные, скорректированные фотограмметрические карты, цифровые модели рельефа и 3D-модели местности с высокой точностью и скоростью. Основным техническим принципом здесь является стереоскопическая фотограмметрия, которая основана на обработке пар перекрывающихся стереоскопических изображений, позволяющих измерять горизонтальные и вертикальные координаты объектов [4].

Традиционный процесс создания карт на основе данных аэрофотосъемки включал в себя трудоемкий этап создания базы данных съемки (полевое картирование – местоположения с известными координатами). В данной статье предлагается отказаться от традиционного полевого подхода к картографированию. Вместо этого авторы рекомендуют использовать данные с бортовой GNSS-станции дрона и файлы RINEX, полученные от сети базовых станций. Интегрированная обработка с использованием технологии постобработки (Post-Processing Kinematic – PPK) позволяет напрямую определять высокоточные координаты центров проекций каждого изображения, что значительно упрощает и ускоряет весь рабочий процесс [5–7].

Цель исследования – разработка и оценка новых методов повышения точности координатной привязки аэрофотоснимков, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов в условиях отсутствия на земле опорных точек.

Материалы и методы исследования

Данная методика основывается на использовании информации, поступающей от локальных сетей постоянных станций глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) [8–10]. При создании ортофотопланов и цифровых моделей местности была оценена точность результатов для трех сценариев в условиях отсутствия опорных точек на местности. *Первый сценарий:* расстояние от беспилотного летательного аппарата (БПЛА) до базового приемника, установленного на геодезическом пункте, не превышало 500 м. *Второй сценарий:* расстояние от БПЛА до ближайшей базовой станции спутниковой сети не превышало 30 км. *Третий сценарий:* расстояние от БПЛА до ближайшей базовой станции сети составляло более 70 км. По итогам оценки был проведен анализ точности для каждого сценария, а также выполнен сравнительный анализ с альтернативным методом.

Для решения поставленных задач в работе использованы данные двух типов:

Аэрофотосъемочные данные, полученные с помощью БПЛА Autel EVO II Pro 6K [11] (рис. 1). Ключевыми характеристиками для задач фотограмметрического моделирования являются: Фотокамера: 1-дюймовый 20-мегапиксельный CMOS-датчик Sony, обеспечивающий съемку с разрешением до 6К. Навигационная и вспомогательная системы: Бортовая система включает 12 визуальных датчиков для обзора на 360°, что позволяет осуществлять построение карт в режиме реального времени и повышает безопасность полетов, а также интегрированный ГНСС-приемник. Опорное геодезическое обеспечение: для точной геопривязки снимков использовались данные от пары ГНСС-приемников GPS Fora 1, работавших в качестве базовых станций.

Геодезические измерения, выполненные с использованием ГНСС-оборудования (приемники модели GPS Fora 1) [12] (рис. 2).



Рис. 1. Беспилотный летательный аппарат (типа Autel Evo II Pro)

Примечание: составлен авторами по источнику: URL: <https://geospb.ru/p/geodezicheskaya-modernizaciya-geobox-fora-ppk-1112-drone-upgrade> (дата обращения: 02.01.2026)



Рис. 2. Дифференциальная система GPS Fora 1 и Fora Lux

Примечание: составлен авторами по источнику: URL: <https://geospb.ru/p/gnss-priemnik-geobox-fora-lux/> (дата обращения: 02.01.2026)

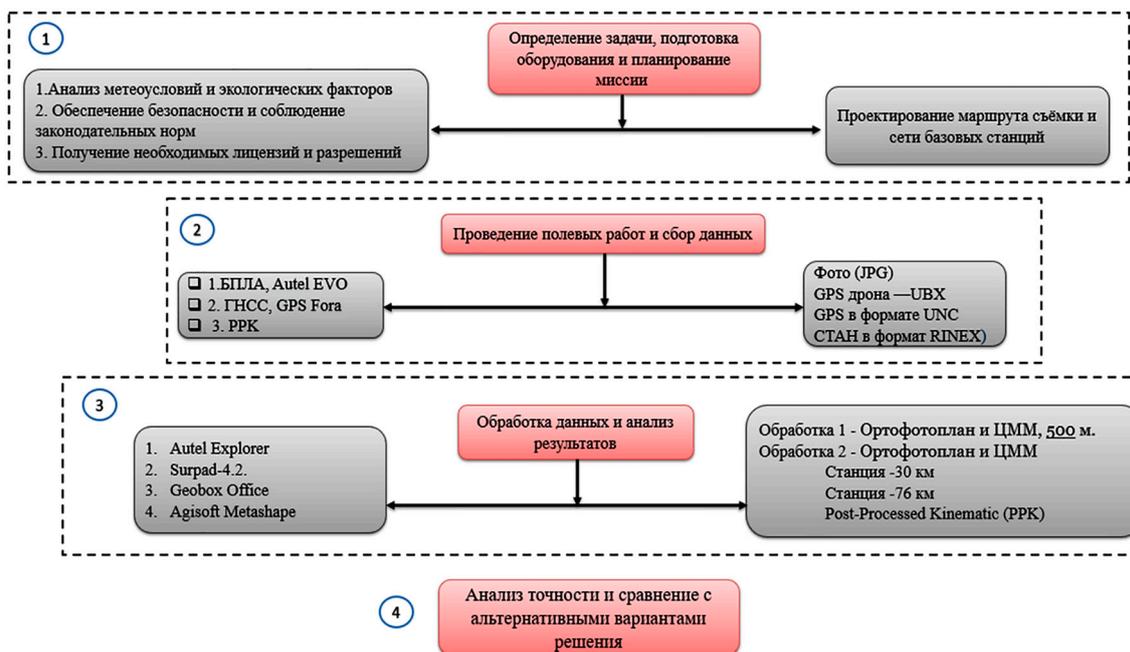


Рис. 3. Порядок исследования

Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Исследование проводилось с использованием следующего программного обеспечения: Autel Explorer – для планирования и управления полетами БПЛА Autel Evo II Pro; Surpad-4.2 – для обработки данных с ГНСС-приемников Fora 1 и Fora Lux; Geobox Office (UAV) – для высокоточной постобработки маршрутов БПЛА на основе данных с базовой станции ГНСС; Agisoft Metashape – для обработки изображений и создания конечных продуктов: ортофото-

планов, цифровых моделей рельефа (ЦМР) и цифровых моделей местности (ЦММ).

Порядок исследования

Исследование выполнялось по стандартной для геодезических задач трехэтапной методологии (рис. 3).

Подготовительный этап. Этот этап включал в себя идентификацию цели, подготовку оборудования (БПЛА Autel Evo II Pro и ГНСС-приемники Fora), планирова-

ние миссии, анализ местности и окружающей среды, а также получение необходимых разрешений в соответствии с требованиями безопасности и законодательства [1, 13].

Результаты исследования и их обсуждение

На втором этапе проводятся полевые работы и сбор данных, на этапе полевых работ были сделаны аэрофотоснимки и собраны первичные данные. Параметры полетной миссии были разработаны с использованием программного обеспечения Autel Explorer (рис. 4).

При создании миссии были определены следующие основные параметры, определяющие качество и полноту охвата: разрешение изображения (Ground Sample Distance – GSD), целевой размер пикселя на местности; высота фотографирования рассчитывается математически на основе заданного разрешения изображения на местности и характеристик камеры; перекрытия – продольное (рх %) и поперечное (ру %); базисы фотографирования – продольный (Вх) и поперечный (Ву); количество маршрутов, временной интервал между изображениями и количество снимков в маршруте [14].

Расчетная высота фотографирования Нф:

$$H_{\phi} = 2R \cdot GSD \cdot (fk/\delta), \quad (1)$$

где Нф – высота фотографирования относительно заданной поверхности (м);

fk – фокусное расстояние фотосистемы (м);

GSD – проекция пикселя матрицы ЦАФА на заданной поверхности (м);

R – разрешение на матрицы (цикл/пиксель)

δ – размер пикселя матрицы (м).

При разрешении GSD, равном 2 см,

$$H_{\phi} = f \cdot GSD / P_{x1} =$$

$$= 0,011 \cdot 0,02 / 0,00000236 = 93,3 \text{ м};$$

по программе (Autel Explorer) Нф = 93 м.

Расчетное продольное перекрытие аэрофотоснимков, рх %:

$$p_x = p_{x0} + \Delta p_h + \Delta p_n, \quad (2)$$

где рх0 – минимальное продольное перекрытие = 60%,

Δрh – поправка за рельеф,

$$\Delta p_h = \Delta h \cdot \frac{(100 - p_{x0})}{H_{\phi}}, \quad (3)$$

где Δh – разность между самой высокой точкой и самой низкой точкой участка,

Δрn – навигационная поправка за ошибку самолетоуправления.

$$\begin{aligned} p_x &= p_{x0} + \Delta p_h + \Delta p_n = \\ &= 60 + (13 - 0) \cdot (100 - 60) / 186 + 4 = 87,34\%, \\ p_x &= 85\% \text{ по (Autel Explorer)}. \end{aligned}$$

Расчетное поперечное перекрытие аэрофотоснимков ру, %:

Для масштаба 1:10 000 и крупнее

$$p_y = 40\% + \left(50 \cdot \frac{\Delta h}{100 \cdot H_{\phi}} \right), \quad (4)$$

Для масштаба 1:10 000 и крупнее

$$p_y = 40 + (50 \cdot (13/186)) = 73,41\%,$$

ру = 70% по (Autel Explorer).

Продольный базис фотографирования, Вх (м):

$$B_x = \frac{(X_{\Pi} M_{\phi})(100 - p_x)}{100}, \quad (5)$$

где Мф = Нф / f – знаменатель масштаба фотографирования,

$$M_{\phi} = 8474,545,$$

$$B_x = 184,88 \text{ по (Autel Explorer)}$$

$$M_{\phi} = 8500, B_x = 185,44.$$

Поперечный базис фотографирования Ву (м):

$$B_y = \frac{(Y_{\Pi} M_{\phi})(100 - p_y)}{100}, \quad (6)$$

где Хп, Yп – физический размер матрицы (м)

$$B_y = 156,4, B_y = 170 \text{ по (Autel Explorer)}.$$

Интервал фотографирования τ (сек):

$$\tau = \frac{X_{\Pi} H_{\phi}}{f \cdot w} \cdot \frac{100 - p_x}{100}, \quad (7)$$

где Хп – физический размер фото матрицы вдоль линии полета (м),

W – путевая скорость БВС (м/с).

τ = 4 (сек) по (Autel Explorer).

Количество аэроснимков в одном маршруте Nx:

$$N_x = (L_x / B_x) + N_3; N_3 = 4, \quad (8)$$

где Lx – длина участка съемки (м)

$$N_x = 10,27 \text{ по (Autel Explorer)} N_x = 12.$$

Количество маршрутов Ny:

$$N_y = (L_y / B_y) + 0,5 \cdot j; j = 2,$$

где Ny ширина участка (м), (9)

$$N_y = 4, \text{ по (Autel Explorer)} N_y = 4.$$

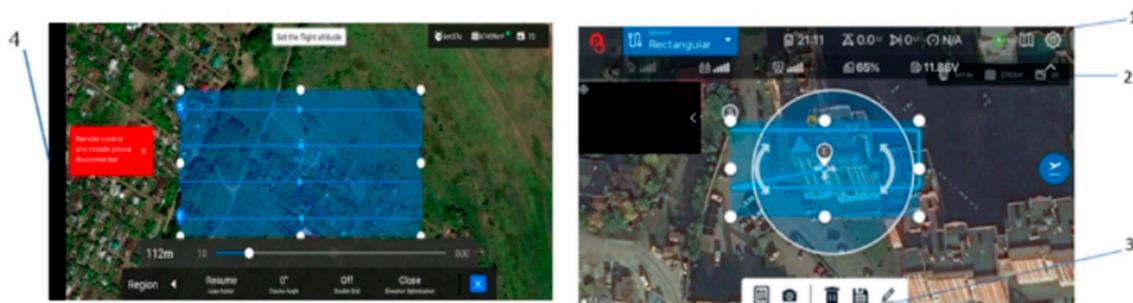


Рис. 4. Программа Autel Explorer: 1 – настройка; 2 – создание новой миссии; 3 – редактирование миссии; 4 – настройка параметров съемки
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования



Рис. 5. Расчетные данные аэрофотосъемки в программе Autel Explorer
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

На рис. 5 показаны расчетные параметры аэрофотоснимков, сгенерированные программой Autel Explorer, и проведено их сравнение с результатами, полученными с использованием аналитических формул для съемки.

Третий, камеральный этап включает постобработку собранных данных. Базовым требованием для корректной обработки и компенсации погрешностей является синхронная регистрация в реальном времени полета информации из следующих источников: данные БПЛА (файл формата UBX), измерения наземной станции Foga Lux (файл формата UNC) и аэрофотоснимки (формат JPG). Первичная обработка заключается в преобразовании файлов спутниковых измерений в формат RINEX с последующей коррекцией координат центра

съемки относительно опорной точки. Полученные поправки применяются к снимкам для минимизации ошибок геопривязки на дальнейших этапах. Данный этап выполняется в программном комплексе Geobox Office, который обеспечивает обработку ГНСС-измерений, коррекцию временных меток в RINEX-файлах, фильтрацию дублирующихся данных, сопоставление снимков с точными координатами (с возможностью редактирования метаданных EXIF) и работу с локальными системами координат [15] (рис. 6). Процесс обработки в Geobox Office включает следующие шаги: загрузка файла данных приемника БПЛА и файла статической наземной базовой станции, где расстояние от БПЛА до базового приемника, установленного на геодезическом пункте, не превышало 500 м; автоматическая за-

грузка стандартных параметров обработки с последующей возможностью их ручной коррекции; задание координат наземной станции (ручной ввод или автоматический расчет как среднего значения измерений приемника); добавление аэрофотоснимков и запуск процесса обработки.

В результате для каждого изображения генерируется набор модифицированных координат. Эти данные импортируются в программный комплекс Agisoft Metashape для обработки изображений и создания конечного продукта. Рабочий процесс включает в себя создание плотного облака точек, построение 3D-модели и текстуры, а также

генерацию производных продуктов – ЦМР и ортофотоплана на основе плотного облака точек и модели [16, 17] (рис. 7).

При сравнении координат центра изображения, полученных из файла данных приемника БПЛА, которые выступают в качестве контрольных точек, с координатами центра изображения после обработки в Geobox Office были обнаружены следующие ошибки: максимальная ошибка по оси X составляет 4,79 см, по оси Y = 5,75 см, по высоте Z = 8,021 см, по плоскости XY = 7,48 см, а общая ошибка, или среднее квадратическое отклонение, составляет 10,97 см. Результаты сравнения представлены на рис. 8.

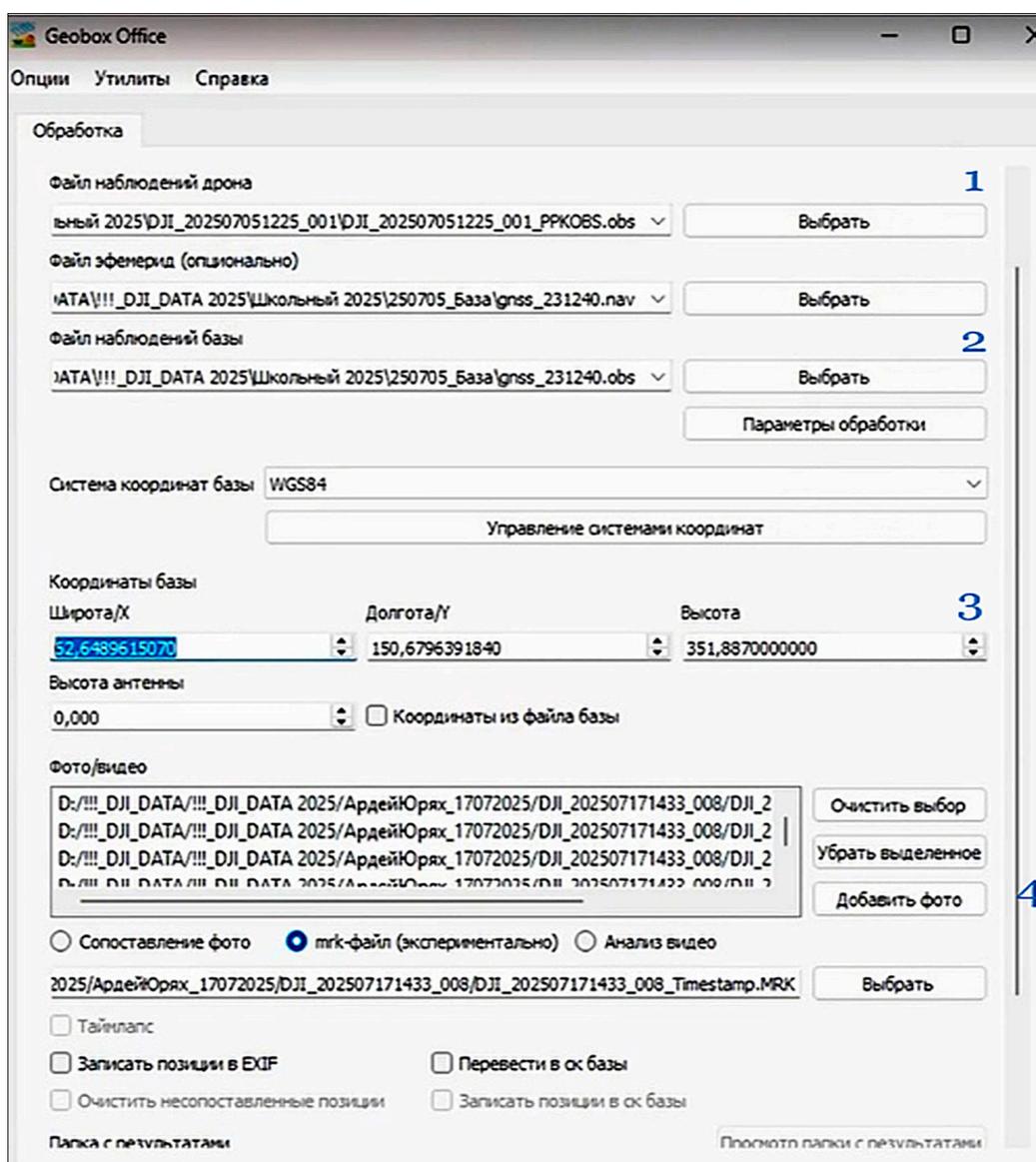


Рис. 6. Процесс обработки данных в программе Geobox Office
 Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

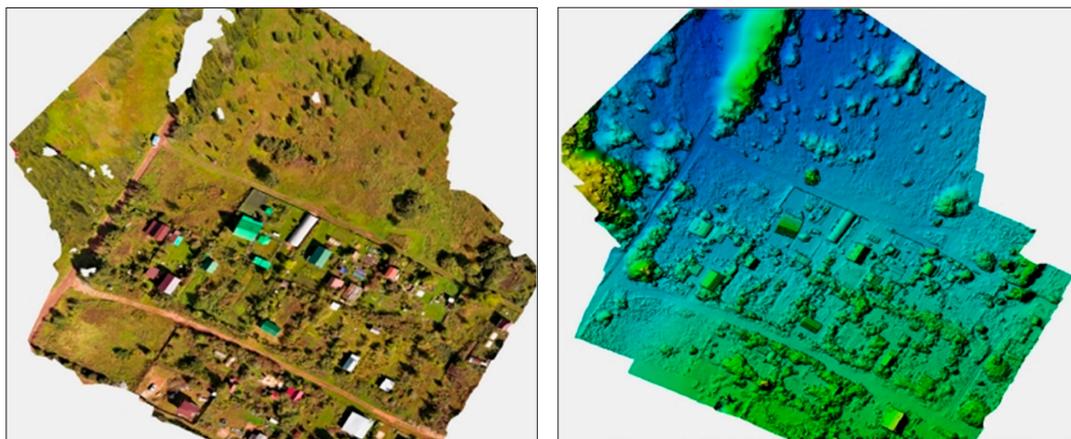


Рис. 7. Ортофотоплан и ЦММ, поселок Лекаревка, город Уфа, Республика Башкортостан
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования



Рис. 8. Погрешность определения координат (Лекаревка)
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Для создания ортофотоплана и цифровой модели местности для второго сценария, где расстояние между БПЛА и ближайшей базовой станцией спутниковой сети (в данном случае станцией UFA2) не превышает 30 км, а местоположение находится к северо-востоку от точки аэрофотосъемки, авторы повторяют обработку в программном обеспечении Geobox Office. Это включает в себя загрузку файла данных с приемника БПЛА и файла RINEX, полученного со станции UFA2. Файл RINEX можно загрузить с официального сайта CORS.

На рис. 9 показано, как загрузить файл с официального сайта: первый шаг – выбор

базовой станции – UFA2, второй – указание часового пояса, третий – установка параметра «Точность измерения» на 10 с, который является общедоступной максимально возможной точностью, и последний шаг – загрузка файла RINEX [18]

В исследовании использовались данные постоянной станции URNA. Файл наблюдений в формате RINEX также был получен с официального сайта сети. Станция URNA расположена примерно в 31 км к востоку от места проведения аэрофотосъемки, в районе поселка Лекаревка. На рис. 10 показаны географические координаты всех этих точек.

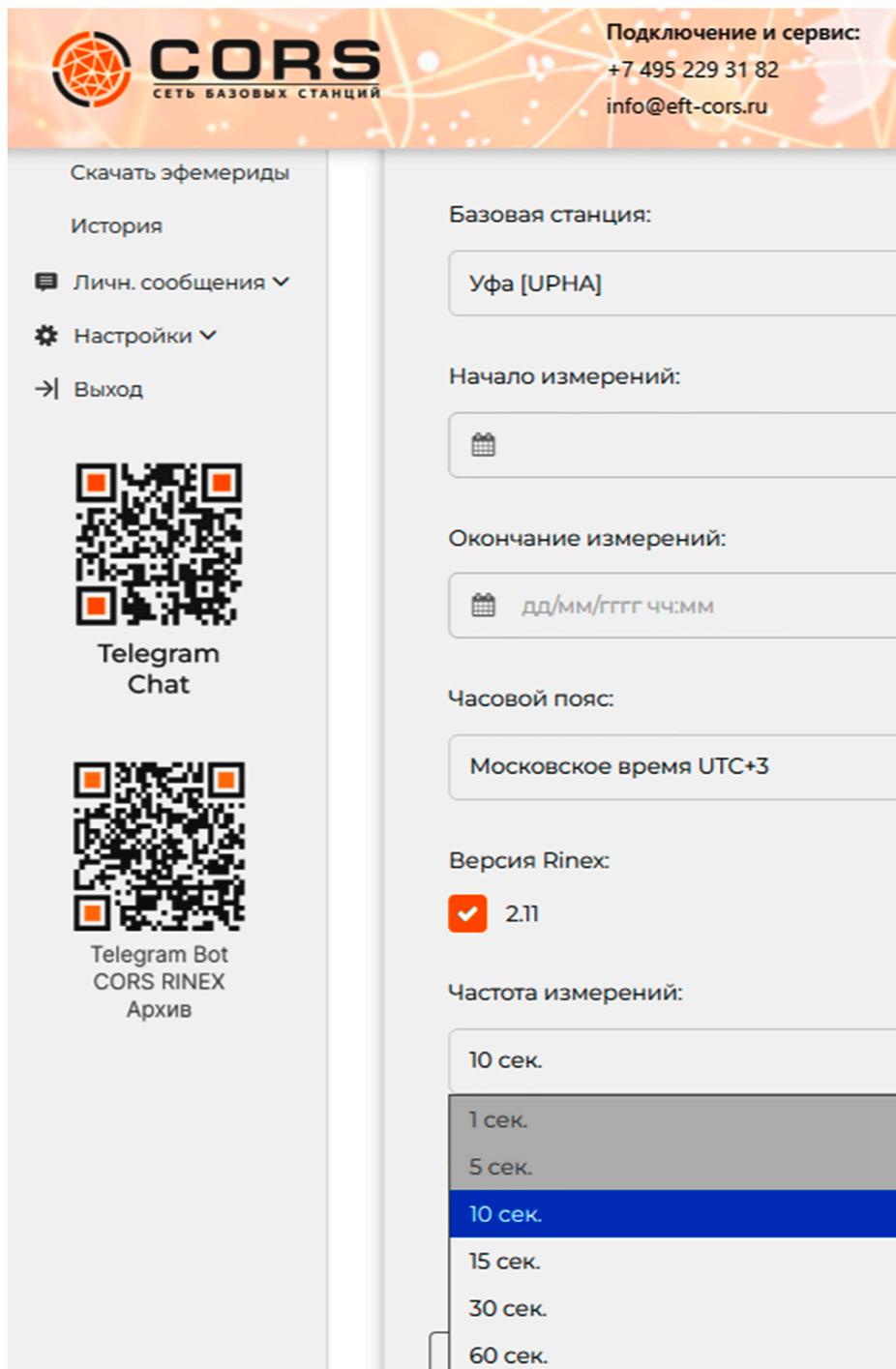


Рис. 9. Порядок загрузки файла RINEX базовой станции Ufa2
 Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Средняя квадратическая ошибка при сравнении координат центра изображения, полученных из файла данных приемника БПЛА, с координатами центра изображения после обработки в Geobox Office для станции UFA2 равнялась 12,56 см и для станции УРНА равнялась

13,38 см. Визуализация результатов сравнения координат приведена на рис. 11 и 12. А в предыдущих сравнениях с наземной базовой станцией, где расстояние от БПЛА до приемника не превышало 500 м, средняя квадратическая ошибка равнялась 10,97 см.

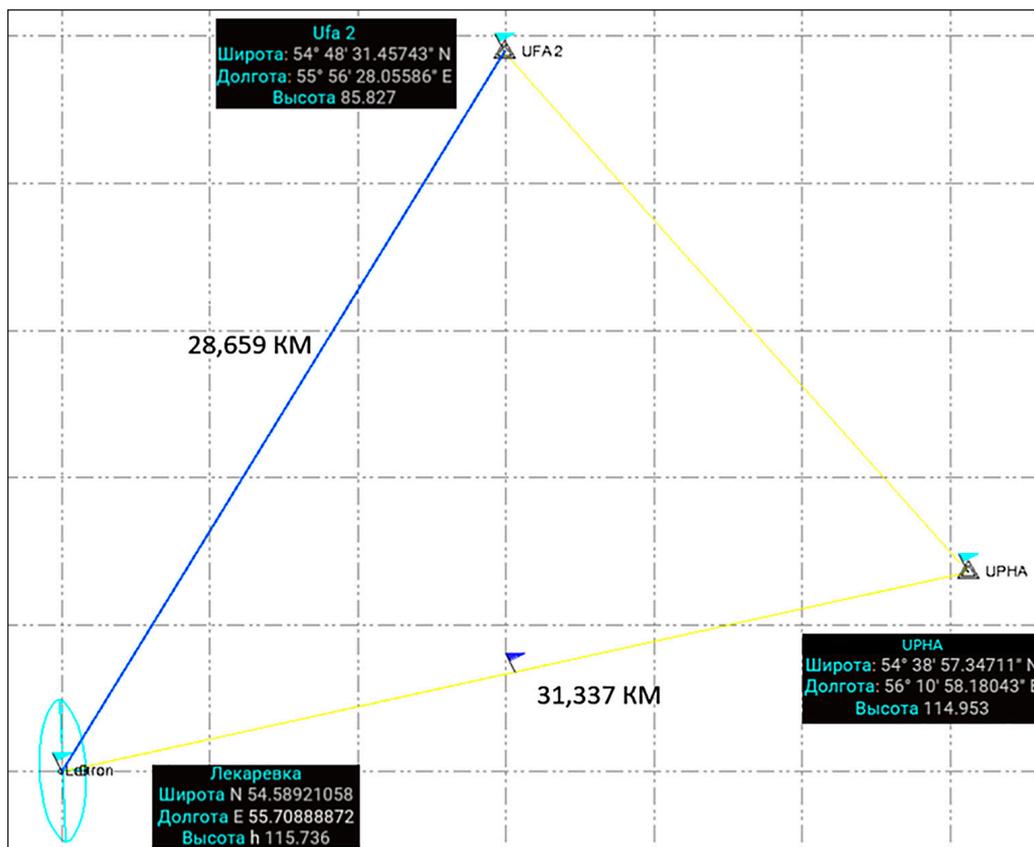


Рис. 10. Картографическая привязка всех пунктов
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

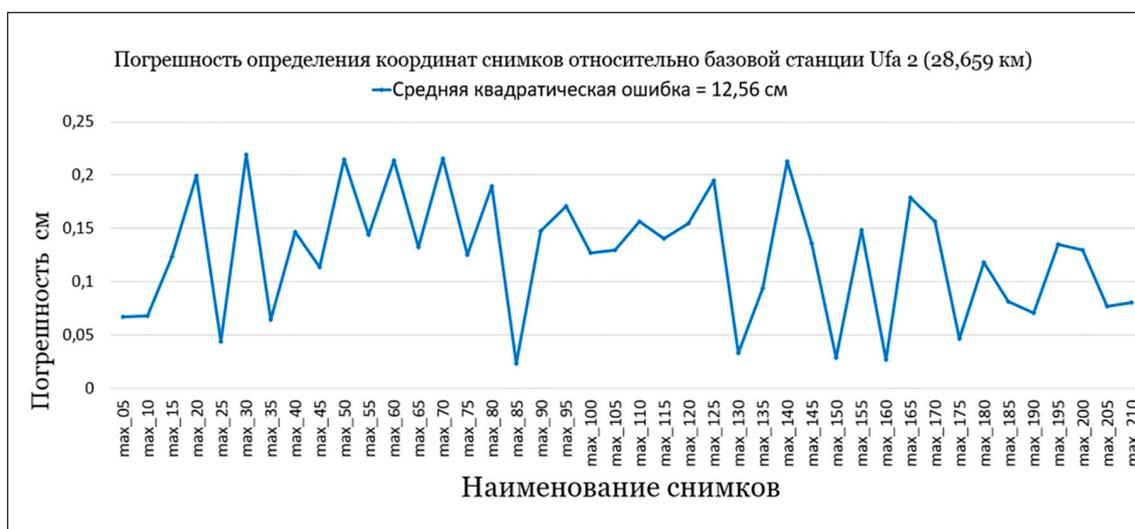


Рис. 11. Погрешность определения координат (Ufa2)
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

При увеличении расстояния между БПЛА и базовой станцией до 76 км (третий сценарий) была использована базовая станция «Раевка», расположенная в 76,242 км

к юго-западу от района съемки. На рис. 13 показана область аэрофотосъемки с БПЛА относительно базовой станции во всех сценариях.

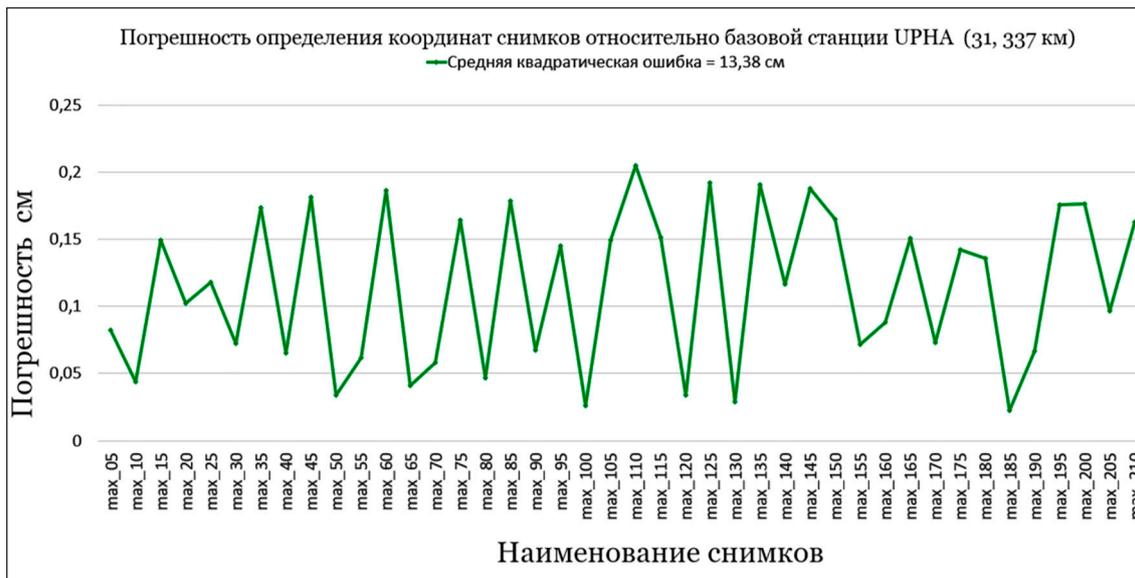


Рис. 12. Погрешность определения координат (URNA)
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

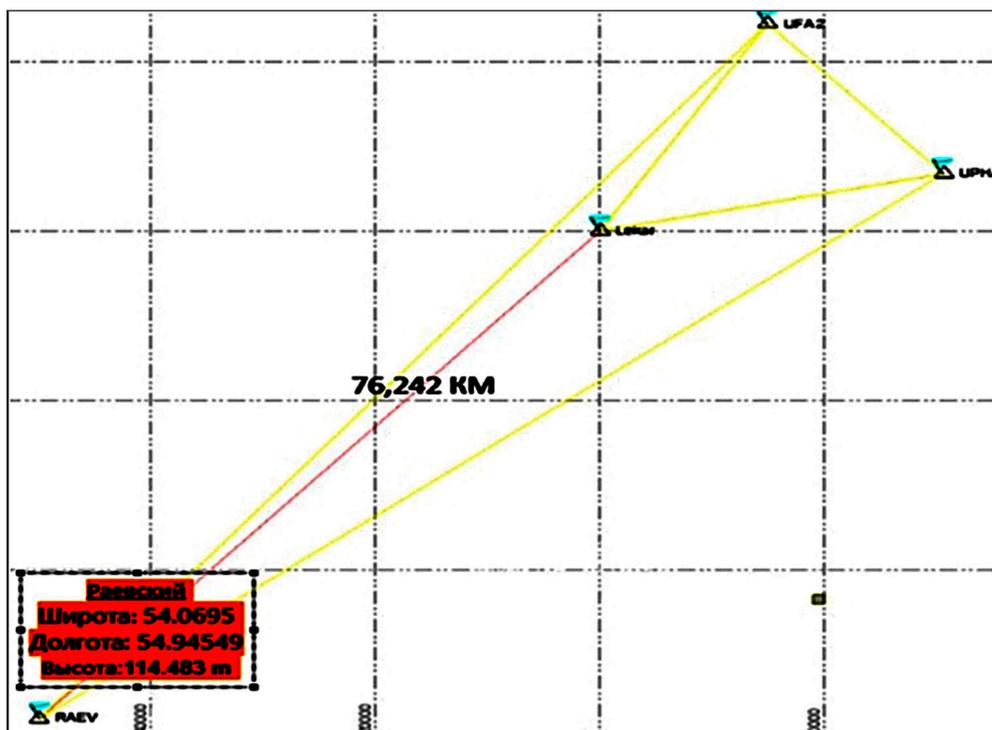


Рис. 13. Картографическая привязка всех базовых станций
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Для обработки данных и получения координат центров фотографирования, которые входят в качестве опорных пунктов, использованы файлы (RINEX) данных станций с официального веб-сайта сети CORS по порядку, как указано на рис. 9. В программном

комплексе Geobox Office были выполнены последовательные шаги: загрузка файла данных приемника БПЛА и данных базовой станции «Раевка» (RINEX), выбор системы координат, добавление фотографий и, наконец, запуск процесса обработки.



*Рис. 14. Погрешность определения координат (Раевка)
Примечание: составлен автором по результатам исследования*

В результате при сравнении координат центров изображений среднее квадратическое отклонение центров изображений составило 12,29 см. Отклонение каждого снимка указано на рис. 14.

Исследование подтверждает возможность построения ортофотоплана и ЦММ с использованием данных открытых ГНСС-станций (файлы RINEX с интервалом 10 с). Показано, что погрешность определения координат незначительно зависит от расстояния до станции, даже при превышении 70 км. Также доказана возможность создания аэрофотоснимков без привлечения классических наземных геодезических точек. В предложенном методе в качестве опорных используются координаты центров самих изображений.

Результаты исследования и их обсуждение

1. Исследование показало, что использование данных RINEX из сети непрерывно работающей ГНСС-станции (CORS) позволяет создавать ортофотопланы и цифровые модели местности без необходимости традиционной полевой геодезии с использованием контрольных точек, требуемых традиционными методами. Эта технология исключает дорогостоящую и трудоемкую полевую работу, необходимую при традиционных методах аэрофотосъемки.

2. Точность ортофотопланов и цифровых моделей местности, полученных с использованием данных от статичного

ГНСС-оборудования, установленного на геодезических пунктах (статический режим), лишь незначительно отличается от точности ортофотопланов и ЦММ, созданных с использованием данных с базовой станции, работающей в постобработке (РПК). Это подтверждает взаимозаменяемость этих двух источников данных для достижения требуемой точности.

3. Средняя квадратическая ошибка определения координат центров изображения, рассчитанная с использованием данных от ГНСС-станций сети CORS, остается стабильной и не показывает статистически значимой зависимости от расстояния между базовой станцией и БПЛА в исследуемых диапазонах (до 76 км). Это демонстрирует надежность и эффективность данной технологии, обеспечивая увеличенную дальность действия до базовой станции.

Список литературы

1. Турк Г. Г., Карачев Н. К. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в геодезии // Вектор ГеоНаук. 2023. Т. 6. № 2. С. 56–60. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-bpla-v-geodezii> (дата обращения: 24.01.2026). DOI: 10.24412/2619-0761-2023-2-56-60. EDN: ETATBS.
2. Сафонова Т. В., Мокряк А. В., Полежаева М. В., Кенжина Д. С. Использование беспилотных летательных аппаратов в геодезии // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. 2025. Т. 10. № 2 (52). С. 116–123. URL: <http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/article/view/841> (дата обращения: 03.01.2026). EDN: ZKGUPC.
3. Пруто А. И., Харитонов Т. Б., Реджепов М. Б. Исследование использования беспилотных летательных аппаратов в геодезии // Вопросы управления недвижимостью,

землеустройства и геодезии. 2022. № 2 (2). С. 51–54. URL: <https://qje.su/ru/nauka/article/90254/view> (дата обращения: 23.01.2026). EDN: ATJVJG.

4. Тихомиров П. В., Скрыпников А. В., Володина Ю. Ю., Бондарев А. Б., Боровлев Ю. А., Викулин И. А. Определение геометрических элементов лесовозных автомобильных дорог посредством современных IT-технологий // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы национальной научно-практической конференции (г. Воронеж, 19–21 апреля 2022 г.). Ч. I. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2022. С. 134–157. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48599316> (дата обращения: 31.01.2026). EDN: XUYYTV.

5. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B3, 2016 XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic. [Электронный ресурс]. URL: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLI-B3/1/2016/isprs-archives-XLI-B3-1-2016.pdf> (дата обращения: 24.01.2026).

6. Rehak M., Skaloud J. Fixed-wing micro aerial vehicle for accurate corridor mapping. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015. II-1/W1: P. 23–31.

7. Акл М. Н., Половнев О. В., Насереддин Х. Х. Применение метода точного позиционирования на непрерывно действующих опорных станциях GNSS в Республике Ливан // Успехи современного естествознания. 2025. № 7. С. 57–62. URL: <https://scinetwork.ru/articles/36611> (дата обращения: 29.01.2026). DOI: 10.17513/use.38412. EDN: PVSPWL.

8. James M. R., Robson S., Smith M. W. Uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys // Earth Surface Processes and Landforms. № 42 (12). P. 1769–1788. ISSN 0197-9337. URL: <https://research.lancaster-university.uk/en/publications/3-d-uncertainty-based-topographic-change-detection-with-structure/> (дата обращения: 31.01.2026).

9. Сомов Е. В., Шевелев С. Л. Расчетная оценка линейного разрешения на местности цифровой беспилотной аэрофотосъемочной системы для задач таксационного дешифрирования (состояние вопроса, проблематика, модели) // Хвойные бореальной зоны. 2025. Т. 43. № 2. С. 20–26. URL: <https://hbz.elpub.ru/jour/article/view/293/287> (дата обращения: 04.02.2026). DOI: 10.53374/1993-0135-2025-2-20-26. EDN: ZFCCYM.

10. Фокин Г. А., Мещеряков Д. Е. Обзор возможностей программно-аппаратного комплекса prince для высокоточного позиционирования методом RTK // Экономика и качество систем связи. 2025. № 37. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-vozmozhnostey-programmno-apparatnogo-kompleksa-prince-dlya-vysokotochnogo-pozitsionirovaniya-metodom-rtk> (дата обращения: 31.01.2026).

kompleksa-prince-dlya-vysokotochnogo-pozitsionirovaniya-metodom-rtk (дата обращения: 31.01.2026).

11. Гафуров А. М., Ермолаев О. П., Усманов Б. М., Хомяков П. В. Создание высокоточных цифровых моделей высот с использованием ГНСС-БПЛА // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2021. Т. 27. № 2. С. 327–339. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47322209>. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-327-339 (дата обращения: 05.01.2026). EDN: TFUDGU.

12. Nex F., Remondino F. UAV for 3D Mapping Applications: A Review. Applied Geomatics. 2014. № 6. № 1–15. DOI: 10.3390/rs4061519.

13. Морковин В. А., Хахулина Н. Б., Семешкина В. В. Эффективность использования БПЛА в геодезии // Вопросы управления недвижимостью, землеустройства и геодезии. 2024. № 1 (5). С. 69–73. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67862560> (дата обращения: 29.01.2026). EDN: QNFMQM.

14. Табаченко А. А. Фотограмметрические технологии обмеров и трехмерных моделей местности при строительстве зданий и сооружений // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 28. С. 903–906. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45487341> (дата обращения: 31.01.2026). EDN: YKBOGO.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024611501 Российской Федерация. Программа чтения эфемеридных данных из RINEX файлов базовых станций государственной сети геодезии и картографии: № 2023689824; заявл. 29.12.2023; опубл. 22.01.2024 / А. В. Корвин; заявитель Акционерное общество «Концерн «Созвездие». EDN: DCMYQX.

16. Насереддин Х. Х., Алексашина Е. В., Акель М. А. Повышение точности общедоступной цифровой модели местности с использованием имитационного моделирования аэрофототопографической съемки в программном обеспечении Blender // Успехи современного естествознания. 2025. № 6. С. 71–83. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82561477> (дата обращения: 31.01.2026). DOI: 10.17513/use.38405. EDN: MYUKXX.

17. Недобитков А. И. Цифровая транспортная трасология на основе Agisoft Metashape и беспилотного летательного аппарата // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2022. Т. 19. № 6 (88). С. 890–899. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-6-890-899. EDN: VGLTGZ.

18. Westoby M. J. et al. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology, 2012. 179. P. 300–314.

URL: https://pure.aber.ac.uk/ws/portalfiles/portal/4916016/Westoby_et_al._GEOMORPH_2012_Accepted.pdf (дата обращения: 29.01.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.