70/1 2026
ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ

# ГЕОДЕЗИЯ И АЭРОФОТОСЪЕМКА

МИИГАиК

ISSN 0536-101X
e-ISSN 2618-7299

Published by Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK)

Izvestia Vuzov.
**Geodesy and Aerophotosurveying**

Научное издание Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК)

**Научное издание Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК)**

Published by Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK)

Izvestia Vuzov.

**Geodesy and Aerophotosurveying**

# ГЕОДЕЗИЯ

# И АЭРОФОТОСЪЕМКА

**70/1 2026**

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ

Москва, Россия
Moscow, Russia

# О журнале


| | |
|---|---|
| **полное название** | Известия высших учебных заведений «Геодезия и аэрофотосъемка» |
| **сокращенное название** | Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка» |
| **специализация** | аэрокосмические исследования Земли, геодезия, геоинформатика, землеустройство, кадастр, картография, мониторинг земель, фотограмметрия, оптические и оптико-электронные приборы и комплексы |
| **периодичность** | 6 выпусков в год |
| **языки** | русский, английский |
| **учредитель, издатель** | Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК) |
| **страна, город** | Россия, Москва |
| **год основания** | 1957 |
| **ISSN** | 0536-101X |
| **e-ISSN** | 2618-7299 |
| **веб-сайт** | www.miigaik.ru/gia |
| **подписка** | подписной индекс в Каталоге — 70365 Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ |
| **индексирование** | включен в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК, Российский индекс научного цитирования (ядро РИНЦ), RSCI (Russian Science Citation Index) Web of Science, «Белый список» научных журналов |
| **лицензия** | материалы журнала распространяются в открытом доступе по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) |

# About the Journal


| | |
|---|---|
| **full international title** | Proceedings of Higher Education Institutions. Geodesy and Aerophotosurveying (Izvestiâ vysših učebnyh zavedenij. Geodeziâ i aèrofotos"emka) |
| **short international title** | Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying |
| **subject areas** | earth aerospace survey, geodesy, geoinformatics, land management, cadastre, cartography, land monitoring, photogrammetry, optical and optoelectronic devices and complexes |
| **frequency** | bimonthly (every two months) |
| **languages** | Russian, English |
| **founded and published by** | Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK) |
| **city, country** | Moscow, Russia |
| **founded in** | 1957 |
| **ISSN** | 0536-101X |
| **e-ISSN** | 2618-7299 |
| **website** | www.miigaik.ru/gia |
| **subscription** | catalogue subscription number – 70365 (Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation) |
| **indexed in** | Higher Attestation Commission list of reviewed scientific journals, Russian Science Citation Index based on the Scientific Electronic Library eLIBRARY.RU – RSCI (Web of Science group), White List of scientific journals |



| | |
|---|---|
| **license** | the material is published on the basis of Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) |

# Редакционная коллегия


| | | |
|---|---|---|
| главный редактор | **Савиных Виктор Петрович** | академик РАН, д-р техн. наук, профессор; Россия |
| заместитель главного редактора | **Братков Виталий Викторович** | д-р геогр. наук; Россия |
| члены редакционной коллегии | **Белоцерковский Андрей Владленович** | д-р физ.-мат. наук, профессор; Россия |
| | **Бондур Валерий Григорьевич** | академик РАН, д-р техн. наук, профессор; Россия |
| | **Верещака Тамара Васильевна** | д-р техн. наук, профессор; Россия |
| | **Вилла Ортега Хосе Хоакин** | канд. техн. наук; Колумбия |
| | **Гайрабеков Ибрагим Гиланиевич** | д-р техн. наук; Россия |
| | **Гвишиани Алексей Джерменович** | академик РАН, д-р физ.-мат. наук; Россия |
| | **Господинов Славейко** | д-р геодезии, профессор; Болгария |
| | **Денисенко Олег Валентинович** | д-р техн. наук; Россия |
| | **Журкин Игорь Георгиевич** | д-р техн. наук, профессор; Россия |
| | **Кресс Вольфган** | д-р техн. наук, профессор; Германия |
| | **Малинников Василий Александрович** | д-р техн. наук, профессор; Россия |
| | **Мазурова Елена Михайловна** | д-р техн. наук; Россия |
| | **Нейман Юрий Михайлович** | д-р техн. наук, профессор; Россия |
| | **Непоклонов Виктор Борисович** | д-р техн. наук, профессор; Россия |
| | **Нехин Сергей Степанович** | д-р техн. наук; Россия |
| | **Оберст Петер Юрген** | д-р техн. наук, профессор; Германия |
| | **Пимшин Юрий Иванович** | д-р техн. наук, профессор; Россия |
| | **Райзман Юрий Григорьевич** | канд. техн. наук; Россия |
| | **Сизов Александр Павлович** | д-р техн. наук, профессор; Россия |
| | **Уставич Георгий Афанасьевич** | д-р техн. наук, профессор; Россия |
| | **Холота Петр** | д-р техн. наук; Чехия |
| | **Чибуничев Александр Георгиевич** | д-р техн. наук, профессор; Россия |
| | **Шух Гаральд** | д-р техн. наук, профессор; Германия |
| | **Яшкин Станислав Николаевич** | д-р техн. наук, профессор; Россия |



**Учредитель и издатель**
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
**Адрес:** 105064, Москва, Гороховский пер., 4
**e-mail:** gia@miigaik.ru

© МИИГАиК


**Выпускающий редактор:** Фомина Н.В.
**Научный редактор:** Шишкина М.В.
**Технический редактор:** Журавлева Е.Д.
**Дизайн-макет:** Леднёва С.В.
**Верстка:** Леднёва С.В., Журавлева Е.Д.

**Подписано в печать 27.02.2026.**
Гарнитуры Source Serif Pro, Montserrat.
Формат 60×90$^1$/$_8$.
Бумага мелованная.
Печать цифровая.
Объем 23 усл. печ. л.
Тираж 500 экз.
Заказ № 14. Цена договорная.

**Редакция**
Служба редакционно-издательской деятельности и наукометрии
Отпечатано в типографии ООО «ПринтСайдАп»
printside.ru

# Editorial Board


| | | |
|---|---|---|
| **editor-in-chief** | **Viktor P. Savinykh** | RAS Academician, Professor, Doctor of Engineering; Russia |
| **deputy editor-in-chief** | **Vitaliy V. Bratkov** | Dr. of Sci. (Geography); Russia |
| **members of the editorial board** | **Andrey V. Belotserkovskiy** | Professor, Dr. of Sci. (Phys.-Math); Russia |
| | **Valeriy G. Bondur** | RAS Academician, Professor, Dr. of Engineering; Russia |
| | **Alexander G. Chibunichev** | Professor, Doctor of Engineering; Russia |
| | **Oleg V. Denisenko** | Doctor of Engineering; Russia |
| | **Ibragim G. Gairabekov** | Doctor of Engineering; Russia |
| | **Slaveyko Gospodinov** | Professor, Dr. of Sci. (Geodesy); Bulgaria |
| | **Alexei D. Gvishiani** | RAS Academician, Dr. of Sci. (Phys.-Math); Russia |
| | **Petr Holota** | Doctor of Engineering; Czech Republic |
| | **Wolfgang Kresse** | Professor, Doctor of Engineering; Germany |
| | **Vasiliy A. Malinnikov** | Professor, Doctor of Engineering; Russia |
| | **Elena M. Mazurova** | Doctor of Engineering; Russia |
| | **Sergey S. Nekhin** | Doctor of Engineering; Russia |
| | **Viktor B. Nepoklonov** | Professor, Doctor of Engineering; Russia |
| | **Yuri M. Neyman** | Professor, Doctor of Engineering; Russia |
| | **Jürgen Oberst** | Professor, Doctor of Engineering; Germany |
| | **Yuri I. Pimshin** | Professor, Doctor of Engineering; Russia |
| | **Yuri G. Raizman** | PhD in Engineering; Russia |
| | **Harald Schuh** | Professor, Doctor of Engineering; Germany |
| | **Alexander P. Sizov** | Professor, Doctor of Engineering; Russia |
| | **Georgy A. Ustavich** | Professor, Doctor of Engineering; Russia |
| | **Tamara V. Vereshchaka** | Professor, Doctor of Engineering; Russia |
| | **José Joaquín Vila-Ortega** | PhD in Engineering; Colombia |
| | **Stanislav N. Yashkin** | Professor, Doctor of Engineering; Russia |
| | **Igor G. Zhurkin** | Professor, Doctor of Engineering; Russia |



**Founded and published by**
Moscow State University
of Geodesy and Cartography
**Address**
105064 Moscow, Russia,
Gorokhovskiy pereulok, 4
**e-mail:** gia@miigaik.ru


© MIIGAiK


**Project Management by:**
Nina V. Fomina
**Edited by:** Mariya V. Shishkina
**Design concept by:**
Svetlana V. Ledneva
**Illustrations by:**
Ekaterina D. Zhuravlyova
**Layout by:** Svetlana V. Ledneva,
Ekaterina D. Zhuravlyova

**Published on 27.02.2026.**
Fonts Source Serif Pro, Montserrat.
Format 60×90 1/8.
Coated paper.
Digital print.
23 printed sheet.
500 copies. Order No. 14.

**Editorial Office**
Department of Editorial
and Publishing Activities
and Scientometrics
Printed by PrintSide
printside.ru

# Содержание


| | | |
|---|---|---|
| геодезия | **Куприянов А.О., Морозов Д.А., Замогильный Д.**<br>Локальный мониторинг параметров ионосферы в полярной области по наблюдениям ГНСС | **12** |
| | **Жидяев С.С.**<br>Экспериментальное исследование возможностей наземного лазерного сканирования для высокоточного мониторинга плановых смещений инженерных объектов | **29** |
| | **Биханга Бьенвеню**<br>Комплексная оценка дифференциальных деформаций противоположных сторон плотины Рвегура методами геодезического и пьезометрического мониторинга | **52** |
| аэрокосмические исследования земли, фотограмметрия | **Сквазников М.А., Колыгин Д.Л., Марков А.В., Иванец М.О.**<br>Применение методов экспертного оценивания в задачах космического мониторинга строительства заводов по производству сжиженного природного газа | **64** |
| геоинформатика, картография | **Гемджо Лионель, Загребин Г.И.**<br>Картографирование климатических условий для сельского хозяйства в бассейне реки Конго | **77** |
| | **Камынина Н.Р., Логинов Д.С.**<br>От картографического обеспечения к геоинформационным сервисам управления недропользованием: мировые практики, российские ограничения и экономические эффекты | **91** |
| | **Капустина О.А., Антонова О.В.**<br>Геоинформационная система оценки природно-техногенной сейсмичности месторождений полезных ископаемых | **110** |
| землеустройство, кадастр и мониторинг земель | **Кречетников В.В., Титов И.Е., Шубина О.А., Кречетникова Е.О.**<br>Применение базы пространственно-временных геоданных для оценки современного радиоэкологического состояния сельскохозяйственных земель Брянской области, временно выведенных из оборота | **128** |
| | **Дроздов С.В., Гилёва Л.Н.**<br>Модель комплексного мониторинга элементов геотехнической системы на лицензионных участках нефтегазоконденсатных месторождений | **141** |
| | **Аврунев Е.И., Гармаш В.В., Гоголев Д.В., Чернов А.В.**<br>Разработка технологической схемы создания пространственной модели территориального образования для подготовки документов территориального планирования | **157** |
| оптические и оптико-электронные приборы и комплексы | **Терин М.А., Филонов А.С.**<br>Автоматическая калибровка лазерного спектрометра для мониторинга газов: подход на основе диодно-лазерной абсорбционной спектроскопии | **174** |

# Contents


geodesy

**Kupriyanov A.O., Morozov D.A., Zamogilny D.** **12**
Local Monitoring of Ionospheric Parameters in the Polar Region Based on GNSS Observations

**Zhidyaev S.S.** **29**
Experimental Study of the Capabilities of Terrestrial Laser Scanning for High-Precision Monitoring of Planar Displacements of Engineering Structures

**Bienvenu Bihanga** **52**
Integrated Assessment of Differential Deformations of the Opposite Sides of Rwegura Dam by Geodetic and Piezometric Monitoring Methods

earth aerospace survey, photogrammetry

**Skvaznikov M.A., Kolygin D.L., Markov A.V., Ivanets M.O.** **64**
Application of Expert Assessment Methods in Problems of Space Monitoring of Construction of Liquefied Natural Gas Plants

geoinformatics, cartography

**Guemdjo Lionel, Zagrebin G.I.** **77**
Mapping Climatic Conditions for Agriculture in the Congo River Basin

**Kamynina N.R., Loginov D.S.** **91**
From Cartographic Support to Geoinformation Services for Subsoil Use Management: Global Practices, Russian Restrictions, and Economic Effects

**Kapustina O.A., Antonova O.V.** **110**
Geoinformation System for Assessing Natural and Technogenic Seismicity of Mineral Deposits

land management, cadastre and land monitoring

**Krechetnikov V.V., Titov I.E., Shubina O.A., Krechetnikova E.O.** **128**
Application of a Spatio-Temporal Geodata Base for Assessing the Current Radioecological State of Agricultural Lands in the Bryansk Region That Have Been Temporarily Withdrawn from Circulation

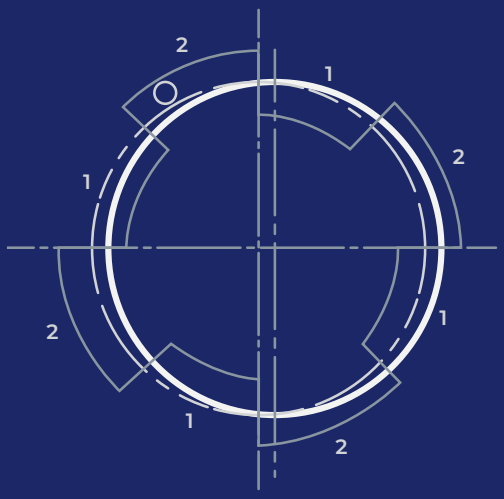
**Drozdov S.V., Giljova L.N.** **141**
A Model for Integrated Monitoring of Components of Geotechnical Systems within Licensed Areas of Oil, Gas, and Condensate Fields

**Avrunev E.I., Garmash V.V., Gogolev D.V., Chernov A.V.** **157**
Development of a Technological Scheme for Creating a Spatial Model of a Territorial Entity for the Preparation of Territorial Planning Documents

optical and optoelectronic devices and systems

**Terin M.A., Filonov A.S.** **174**
Automatic Calibration of Laser Spectrometer for Gas Monitoring: Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy Based Approach

# ЮБИЛЕЙНЫЙ ТОМ ЖУРНАЛА "ГЕОДЕЗИЯ И АЭРОФОТОСЪЕМКА"





## *САВИНЫХ Виктор Петрович*

***главный редактор, академик РАН, доктор технических наук, профессор, дважды Герой Советского Союза, летчик-космонавт СССР, президент МИИГАиК***

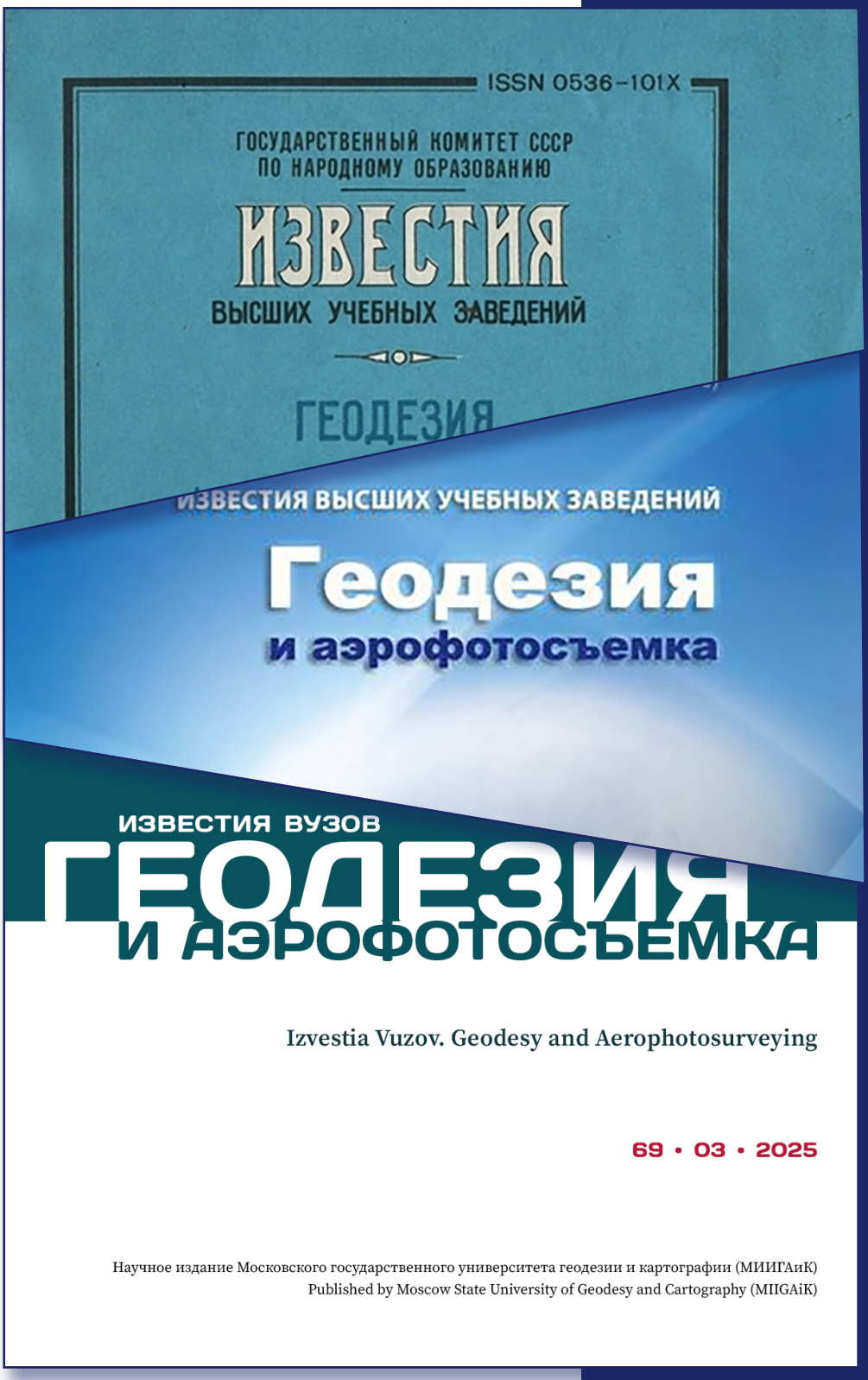
**Уважаемые исследователи, читатели, дорогие друзья!**

**Перед вами —** юбилейный 70-й том научного журнала Московского государственного университета геодезии и картографии «Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка». Его история тесно связана с развитием ключевых научных направлений в системе наук о Земле и становлением отечественной геодезической школы. Основанный в 1957 году в составе серии «Известия высших учебных заведений» по решению Министерства высшего образования СССР, журнал изначально рассматривался как специализированная научная площадка, предназначенная для консолидации исследовательского потенциала высших учебных заведений, научно-исследовательских институтов и производственных организаций страны. Несколько десятилетий журнал выполнял важную функцию распространения научного знания и обеспечивал профессиональное взаимодействие специалистов, работающих в области геодезии, картографии и аэрофотосъемки.

**Выпуск журнала был** поручен Московскому институту инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии (МИИГАиК). На начальном этапе значительную роль в формировании научно-редакционной политики издания сыграл выдающийся ученый и организатор высшего образования Петр Сергеевич Закатов. Уже в первые годы своего существования журнал приобрел статус авторитетного научного издания, ориентированного на освещение результатов фундаментальных и прикладных исследований в области геодезии, фотограмметрии, картографии, аэрокосмических методов изучения Земли, а также оптики и специализированного приборостроения.

**Первым главным редактором** журнала стал доктор технических наук, профессор А. И. Мазмишвили. В состав редакционной коллегии вошли ведущие специалисты отрасли, внесшие существенный вклад в развитие теоретических и методологических основ геодезических и картографических исследований. Их деятельность во многом определила высокий научный уровень публикаций и сформировала устойчивые академические традиции издания. Многолетняя история журнала отражает процессы развития научной мысли, преемственность исследовательских традиций и значительный вклад отечественных ученых в формирование современных представлений о геодезических и аэрокосмических методах изучения Земли.

**Сегодня научный журнал** МИИГАиК «Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка» продолжает оставаться одним из важнейших изданий, в котором систематически аккумулируется знание и собираются новые результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в сфере геодезии, картографии, аэрофотосъемки и оптического приборостроения. Поздравляю коллектив журнала, благодарю за многолетний добросовестный труд, желаю всегда сохранять традиционно высокий уровень требований к статьям и оставаться одним из самых авторитетных изданий университетской науки.




**Обложки журналов в 1990, 2020 и 2025 гг.**



## *КАМЫНИНА Надежда Ростиславовна*

***ректор Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), доктор экономических наук, кандидат технических наук***

**Уважаемые коллеги, издатели,** авторы и читатели научного журнала университета МИИГАиК «Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка»!

**Выход в свет** первого номера юбилейного 70-го тома журнала символизирует преемственность поколений исследователей, инженеров и преподавателей, чьи труды формировали и продолжают формировать современную геодезию, дистанционное зондирование Земли и фотограмметрию. На протяжении всех этих лет журнал является авторитетной площадкой для обмена научными идеями, внедрения инновационных методов и обсуждения актуальных задач отрасли, объединяя профессиональное сообщество в стремлении к развитию и совершенствованию геопространственных технологий.

**Появление журнала именно** в 1957 году — символично и, безусловно, неслучайно. Восстанавливалась инфраструктура послевоенной страны, крепла промышленность, развивались территории, строились железные дороги, гидроэлектростанции. Требовалось быстро и качественно картографировать огромные территории, получать данные для геологии и сельского хозяйства, планировать строительство и инфраструктуру. В это время формировалась мода на науку, знание, поиск, возрождались научные исследования, повышался престиж ученых и их исследований, на орбиту планеты был выведен первый спутник.

**В 1940–1950-е годы** произошел технологический прорыв в области аэрофотосъемки, стереофотограмметрии, оптического приборостроения. С появлением космической геодезии возникли новые инструменты и методы определения координат. Мощные научные школы в области геодезии и картографии развивались в Московском институте инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии. Количество научных работ в этой области резко выросло, и требовался специализированный журнал. Хотя первые статьи о дистанционном зондировании Земли появились позже, научное сообщество понимало, что и геодезия, и картография будут стремительно развиваться. Создание специализированного журнала в МИИГАиК оказалось чрезвычайно своевременным.

**В течение 70** лет журнал поддерживает репутацию отраслевого научного маяка, на который ориентируются не только в России, но и за рубежом. С 1962 по 1972 год по заказу Американского геофизического союза он издавался в переводной версии под названием "Geodesy and Aerophotography". Оригиналы английских выпусков журнала и сегодня находятся в библиотеках Калифорнийского и Мичиганского университетов, университета Теннесси, Стэнфорда, в Национальной библиотеке Австралии.

**Сегодня, когда пространственные** данные имеют ключевое значение в обеспечении устойчивого развития национальной экономики, технологического лидерства государства и повышении уровня жизни граждан, поисковые исследования развиваются и подтверждают крайнюю необходимость в накоплении научного знания. Современный научный журнал «Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка» наполняется актуальными публикациями, создающими солидный теоретический задел, на основе которого будет строиться долгосрочное стратегическое планирование развития отрасли геодезии и картографии в Российской Федерации.

**Поздравляю коллектив, авторов и читателей журнала!** Уверена в его успешном и плодотворном будущем, которое станет важным вкладом в развитие науки и современных технологий.

УДК 528.01/.06
DOI:10.30533/GiA-2026-001

CC BY

# Локальный мониторинг параметров ионосферы в полярной области по наблюдениям ГНСС

**А.О. Куприянов**[1] ✉, **Д.А. Морозов**[1], **Д. Замогильный**[1]

[1] Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия
✉ gnss@miigaik.ru

**цитирование** Куприянов А.О., Морозов Д.А., Замогильный Д. Локальный мониторинг параметров ионосферы в полярной области по наблюдениям ГНСС // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 1. С. 12–28. DOI:10.30533/GiA-2026-001.

**ключевые слова** мониторинг параметров ионосферы, локальная модель ионосферы, полярная ионосфера, полное электронное содержание, ионосферные сцинтилляции

**аннотация** В работе рассматривается локальное моделирование ионосферы в полярной области по наблюдениям глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) на постоянно действующих станциях фундаментальной астрономо-геодезической сети и Международной ГНСС-службы (*англ.* International GNSS Service, IGS). Приведена методика совместного использования станций, относящихся к разным сетям, для проведения локального мониторинга полного электронного содержания. Представлены результаты мониторинга в области от 10 до 50° по долготе и от 65 до 75° по широте для периода с 9 по 16 июля 2020 года. В целях мониторинга использовалось 8 станций наблюдений ГНСС, расположенных внутри и в окрестностях данной области. Получены локальные модели пространственного распределения вертикального полного электронного содержания в виде параметров разложения в ряд Тейлора. Средняя квадратическая погрешность для центральной точки модели в среднем составила 0,12 TECU, а максимальное значение — 0,16 TECU. В рассматриваемый период наблюдались интенсивные возмущения ионосферы, выраженные резким изменением полного электронного содержания, что предварительно было связано с прохождением через рассматриваемую область аврорального овала. Для подтверждения этой гипотезы был выполнен анализ данных космического аппарата DMSP-F18. Установлено, что в период наблюдения возмущений авроральный овал проходил непосредственно через рассматриваемую область и отмечалась высокая интенсивность возмущений. Определено, что в процессе прохождения аврорального возмущения вариабельность вертикального полного электронного содержания повышается в среднем в 4,9 раза.

# 1 Введение

В силу географического положения Российской Федерации наиболее подверженным ионосферным возмущениям регионом на ее территории является Арктика. Возникающие на высоких широтах ионосферные возмущения обусловлены прямым воздействием заряженных частиц, доставляемых солнечным ветром — выбросами солнечной плазмы [1, 2]. Эти возмущения выражаются в повышении проводимости ионосферы и приводят к усилению текущих в ней токов и создаваемых этими токами магнитных полей (магнитные возмущения) [1, 2]. Такие аномальные изменения параметров ионосферы оказывают влияние на функционирование систем коротковолновой радиосвязи и радионавигации[1] [3–5].

Целью работы является разработка методики мониторинга и моделирования параметров ионосферы в Арктической зоне по результатам наблюдений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) на станциях фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) и сети Международной ГНСС-службы (*англ.* International GNSS Service, IGS)[2,3].

В последние годы ФАГС активно развивается в Арктической зоне, несмотря на сложные климатические условия и труднодоступную местность. Созданы пункты на архипелагах Новая Земля, Земля Франца-Иосифа, Северная Земля, в Карелии, Ненецком и Ямало-Ненецком автономных округах[4]. В составе сети IGS также имеются станции в Арктической зоне, некоторые из них находятся в непосредственной близости от границ РФ (SOD3, TRO1, KIRU, KIR8 и др.). Наибольшая плотность станций IGS и ФАГС характерна для Северо-Западного федерального округа. Имеющаяся плотность станций позволяет организовать в данной области мониторинг и моделирование полного электронного содержания ионосферы с высоким пространственным и временным разрешением. Полученные данные могут быть использованы как для решения прикладных задач в области геодезии, позиционирования, радиолокации и радиосвязи, так и для исследования процессов, протекающих в авроральной ионосфере.

Рассмотрим методику мониторинга параметров ионосферы по наблюдениям ГНСС, выбор локальной области и станций для мониторинга, оценку межканальных задержек станций ФАГС и литеральных задержек ГЛОНАСС для всех станций, результаты мониторинга и особенности изменения параметров ионосферы в полярной области.

# 2 Материалы и методы

Для мониторинга параметров ионосферы в локальной области при помощи мультичастотных измерений по сигналам ГНСС целесообразно использовать постоянно действующие наземные станции наблюдений, оснащенные спутниковой геодезической аппаратурой. Для мониторинга ионосферы в полярной области РФ могут применяться данные расположенных там станций IGS, ФАГС, федеральной сети геодезических станций (ФСГС) и др. [6–8]. Рассмотрим факторы, осложняющие их использование.

---

1 Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С. Модель распространения коротких радиоволн в условиях модификации высокоширотной ионосферы // Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики: тезисы докладов Международной научной конференции. СПб.: ААНИИ, 2020. С. 316–317.

2 IGS Guidelines // International GNSS Service. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://igs.org/station-resources/#site-guidelines (дата обращения: 13.07.2025).

3 Карта пунктов ФАГС // Центр точных эфемерид RGS-CENTRE. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://rgs.cgkipd.ru/fags-map (дата обращения: 13.07.2025).

4 Геопрофи. Новости. 16 августа 2022 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://geoprofi.ru/news/samyhj-severnyhj-punkt-fags-naivyhsshego-klassa-tochnosti-v-mire-sozdannyhj-po-zakazu-fgbu-centr-geodezii-kartografii-i-ipd-zarabotal-na-ostrove-khejsa (дата обращения: 22.07.2025).

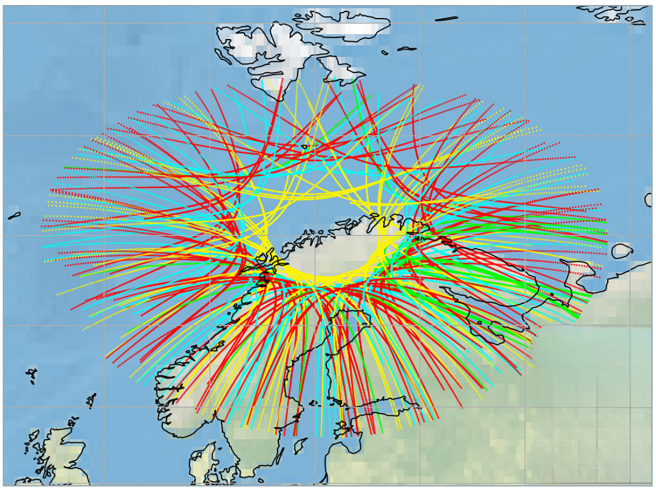
1. Углы наклона орбиты космических аппаратов ГНСС не превышают 64,8° (ГЛОНАСС — 64,8°, GPS — 55°, BDS — 55°, «Галилео» — 56°), из-за чего возникает область небесной сферы, в которой их нет [9]. Для точек, расположенных вблизи полюса, эта область находится примерно вокруг зенита. В результате для каждой наземной станции точки пересечения сигналов ионосферы будут располагаться не равномерно в некоторой области, а в виде овала, как показано на рис. 1. Таким образом, по измерениям одной станции невозможно определить вертикальное полное электронное содержание (*англ.* Vertical Total Electron Content, VTEC), соответствующее положению этой станции и в близлежащей области радиусом примерно 400 км. Для организации мониторинга ионосферы в конкретной области необходимо заранее спроектировать расположение наземных станций для обеспечения необходимой плотности точек пересечения ионосферы в ее пределах.
2. Большая часть Арктической зоны РФ покрыта водами Северного Ледовитого океана, что ограничивает возможности расположения наземных станций наблюдения ГНСС прибрежной зоной и островами. В настоящее время для мониторинга ионосферы в Арктической зоне могут использоваться станции IGS KIR8, KIRU, NYA2, SOD3 и станции ФАГС ARKH, LOVJ, MURM, NARY. Наибольшая концентрация доступных станций характерна для Кольского полуострова.

Для проведения экспериментального исследования по мониторингу параметров ионосферы в арктической области выбрана территория в районе Кольского полуострова. Границы области, оптимальной для мониторинга и моделирования параметров ионосферы, составляют по долготе от 10 до 50°, по широте — от 65 до 75°. Границы выбранного района, а также расположенные в его пределах и поблизости станции IGS и ФАГС представлены на рис. 2.

Для оценки возможностей мониторинга параметров полярной ионосферы по наблюдениям ГНСС на наземных станциях используется специальное программное обеспечение ISIS, разработанное на кафедре прикладной геодезии Московского государственного университета геодезии и картографии. Программное обеспечение реализует следующую методику локального моделирования ионосферы:

**Рис. 1**
Картограмма расположения точек пересечения ионосферы для станции KIRU ($B$ = 67,857°, $L$ = 20,968°)

**Fig. 1**
Cartogram of the ionospheric pierce points for the KIRU station ($B$ = 67.857°, $L$ = 20.968°)



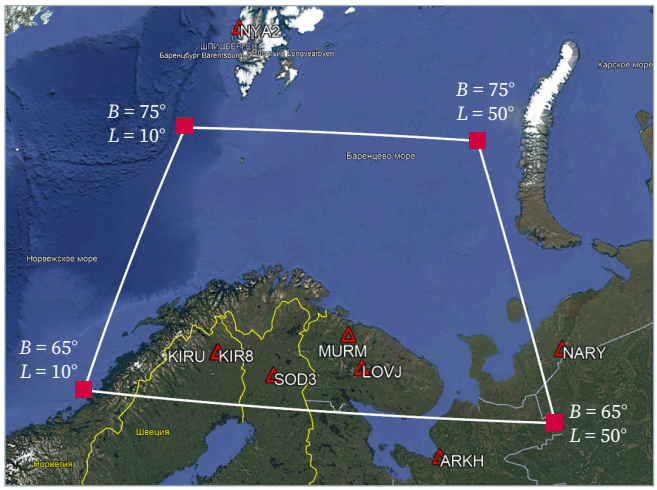
**Условные обозначения**

*Треки космических аппаратов ГНСС*

GPS
ГЛОНАСС
BDS
«Галилео»

**Рис. 2**
Район экспериментального исследования

**Fig. 2**
Experimental research area




**Условные обозначения**

△ постоянно действующая станция ГНСС

1. Выполняется выбор комбинаций сигналов, для которых будет вычисляться VTEC. С учетом технических характеристик установленной спутниковой геодезической аппаратуры для рассматриваемых станций целесообразно использование следующих комбинаций (пар сигналов): GPS L1/L2 и L1/L5, ГЛОНАСС L1/L2, BDS B1/B2 и B1/B3, «Галилео» E1/E5, E1/E6.
2. Для используемых станций ФАГС выполняется оценка межканальных задержек (*англ.* Differential Code Biases, DCB) с применением глобальных ионосферных карт (*англ.* Global Ionosphere Maps, GIM) от IGS [10] при помощи метода, рассмотренного в работе [11], для каждой рассматриваемой пары сигналов.
3. Для используемых станций ФАГС и IGS аналогичным образом выполняется оценка литеральных задержек сигналов ГЛОНАСС, т. е. определяются отдельные значения DCB для каждой литеры (от –7 до 6), используемой в системе.
4. Для каждой станции выполняется вычисление VTEC и геодезических координат (широты и долготы) точки пересечения ионосферы (*англ.* Ionospheric Pierce Point, IPP). Вычисление VTEC производится в следующем порядке для каждой комбинации сигналов:
   - вычисляются разности кодовых и фазовых псевдодальностей на двух частотах для каждого спутника и каждой эпохи наблюдений;
   - в вычисленные разности вносится поправка за межканальную задержку;
   - по известной формуле вычисляются значения полного электронного содержания по кодовым измерениям ($TEC_P$) и по фазовым измерениям ($TEC_L$);
   - выделяются ряды непрерывных наблюдений кодовых и фазовых псевдодальностей;
   - для каждого ряда вычисляются разности $TEC_P$ и $TEC_L$, средневзвешенные значения разности ($dPL_{cp}$) и итоговые значения TEC как $TEC_L + dPL_{cp}$;
   - по координатам станции и спутника для каждого момента времени вычисляется геодезическая широта и долгота IPP, а также значения эллипсоидальной функции отображения ионосферы $MF$[5];
   - вычисляются значения VTEC как произведение $TEC$ и $MF$.
5. Для каждой эпохи наблюдений выполняется оценка коэффициентов разложения VTEC в двухмерный ряд Тейлора[6] (зависимость VTEC от геодезической широты и долготы) при помощи метода наименьших квадратов или расширенного фильтра Калмана (*англ.* Extended Kalman Filter, EKF). При использовании EKF обработка производится в прямом и обратном направлениях, после чего вычисляется смешанное решение.
6. Формируется локальная модель ионосферы в виде значений VTEC, заданных в узлах регулярной сетки для каждой эпохи наблюдений. Вычисление VTEC для каждого узла выполняется при помощи полученных для этой эпохи коэффициентов разложения VTEC в двухмерный ряд Тейлора. Результат сохраняется в формате IONEX.

Для проведения вычислительного эксперимента по мониторингу параметров ионосферы в заданной области был выбран период с 9 по 16 июля 2020 года. Выбор обусловлен спокойной ионосферой с $Kp$-индексом не более 2, за исключением двух дней (13 и 14 июля), когда наблюдалась повышенная геомагнитная активность с $Kp$-индексом 4–5. Это позволяет пронаблюдать в рамках одного периода результат работы методики как для спокойной, так и для возмущенной ионосферы.

5 Xu G., Xu Y. Applications of GPS Theory and Algorithms. GPS: Theory, Algorithms and Applications. 3rd ed. Berlin: Springer, 2016. 489 p.

6 Wild U. Ionosphere and Geodetic Satellite Systems, Permanent GPS Tracking Data for Modelling and Monitoring. Zurich: Schweizerische Geodätische Kommission, 1994. Bd. 48. 155 p.

Для выбранного периода имеются непрерывные наблюдения на станциях ФАГС ARKH, LOVJ, MURM, NARY и станциях IGS KIR8, KIRU, NYA2, SOD3. Такой набор станций позволяет получить достаточную плотность точек пересечения ионосферы в заданной области. На рис. 3 представлено расположение точек пересечения ионосферы в рамках заданной области для выбранных станций на интервале времени в одни сутки.

Наблюдения на доступных станциях позволяют получить от 74 до 135 IPP для каждой эпохи наблюдений в пределах исследуемой области. Зависимость количества IPP от времени представлена в виде графика на рис. 4.

Имеющееся количество IPP позволяет создавать мгновенные локальные модели ионосферы в виде коэффициентов разложения в ряд Тейлора третьего – четвертого порядка. Следует отметить, что соотношение IPP, относящихся к разным ГНСС, в данном случае обусловлено техническими характеристиками используемой на выбранных станциях спутниковой геодезической аппаратуры (поддерживаемыми сигналами), а не свойствами самих ГНСС.

**Рис. 3**
Расположение точек пересечения ионосферы в заданной области и всех возникающих

**Fig. 3**
The location of the ionospheric pierce points in the given area and all emerging ones

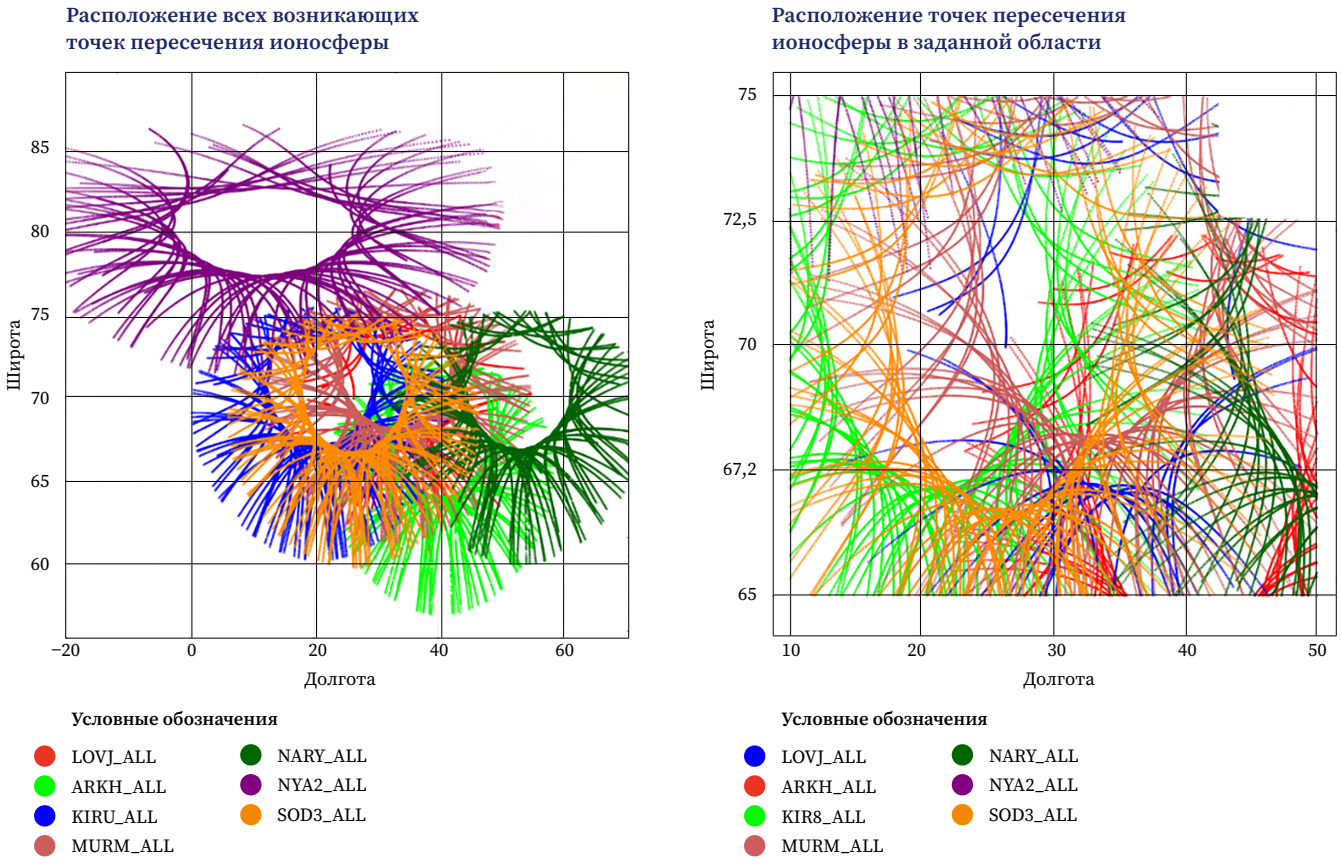
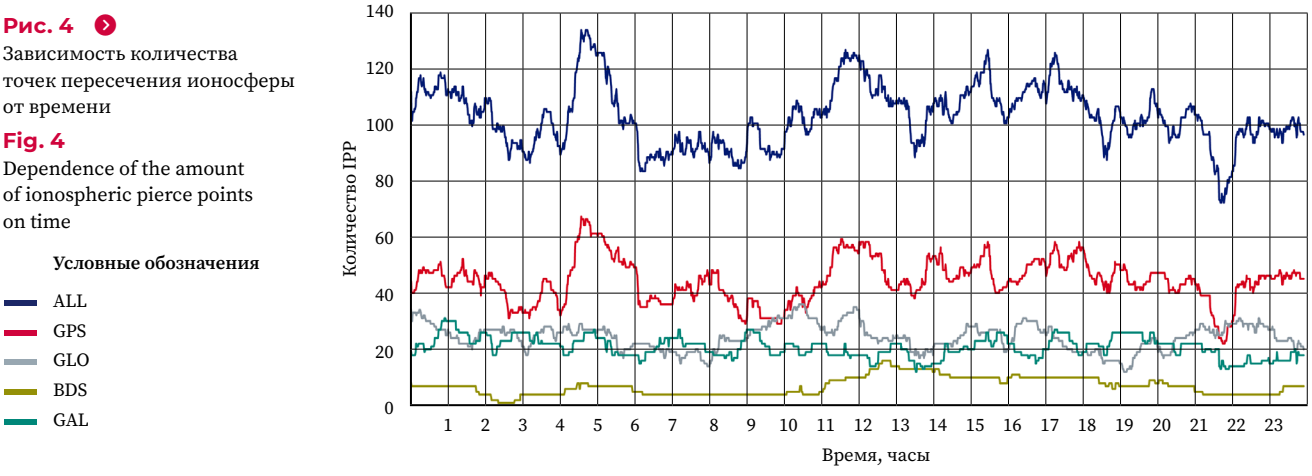



**Рис. 4**
Зависимость количества точек пересечения ионосферы от времени

**Fig. 4**
Dependence of the amount of ionospheric pierce points on time



# 3 Результаты

Существенным фактором, осложняющим использование станций ФАГС для мониторинга параметров ионосферы, является отсутствие необходимых для вычисления VTEC данных о межканальных задержках установленной аппаратуры. Для станций IGS межканальные задержки установленной на станциях аппаратуры оцениваются на регулярной основе[7] и распространяются в формате BSX[8]. Для станций ФАГС оценка межканальных задержек на регулярной основе не производится. Кроме того, формат BSX не предусматривает хранение литеральных задержек сигналов ГЛОНАСС в приемнике, возникающих из-за того, что спутники ГЛОНАСС используют разные несущие частоты (в зависимости от литеры). Для оценки межканальных задержек станций $DCB_{STA}^{SYS}$ ФАГС и литеральных задержек сигналов ГЛОНАСС $DCB_{STA}^{GLO,LIT}$ [9] всех станций произведены дополнительные вычисления с применением GIM [12] в формате IONEX на соответствующие даты. Задержки оценивались как средневзвешенное разностей TEC, вычисленных по измерениям, и TEC, вычисленных по GIM:

1 $$DCB_{STA}^{SYS} = \frac{\sum_0^n (TEC - TEC_{IONEX})P}{\sum_0^n P},$$

где $TEC$ — полное электронное содержание, вычисленное по разностям измеренных псевдодальностей на двух частотах;
$TEC_{IONEX}$ — полное электронное содержание, вычисленное по глобальной ионосферной карте в формате IONEX;
$P$ — вес соответствующего значения $TEC$;
$n$ — количество используемых значений $TEC$.

Значения весов назначаются следующим образом:

2 $$P = \frac{1}{MF},$$

где $MF$ — значения эллипсоидальной функции отображения ионосферы.

Результаты оценки $DCB_{STA}^{GLO,LIT}$ и $DCB_{STA}^{SYS}$ для всех рассматриваемых станций приведены на рис. 5 и 6 соответственно. В качестве результирующих значений используются осредненные значения $DCB_{STA}^{GLO,LIT}$ и $DCB_{STA}^{SYS}$ за 8 суток. Выполнена также оценка средних квадратических погрешностей (СКП) $DCB_{STA}^{GLO,LIT}$ и СКП $DCB_{STA}^{SYS}$ по независимым значениям задержки, полученным на каждые сутки. Результаты оценки СКП приведены в виде гистограмм на рис. 7 и 8.

На рис. 7 видно, что СКП $DCB_{STA}^{GLO,LIT}$ в худшем случае составляет 0,37 нс, в большинстве случаев не превышает 0,20 нс, а в среднем равна 0,14 нс. Если перейти от непосредственно задержек к их влиянию на оценку полного электронного содержания (TEC), то эти значения соответствуют 1,08; 0,58; 0,41 TECU для комбинации сигналов ГЛОНАСС L1/L2. Различия в СКП $DCB_{STA}^{GLO,LIT}$ обусловлены как разным количеством измерений, использованных при оценке (из-за разного числа наблюдаемых спутников с конкретной литерой и разных траекторий их прохождения), так и особенностями станции (применяемая аппаратура, условия наблюдений и помехи, нарастающая интенсивность ионосферных возмущений с увеличением широты).

Необходимо также рассмотреть, насколько обобщенные задержки $DCB_{STA}^{GLO}$ искажают результат по сравнению с использованием $DCB_{STA}^{GLO,LIT}$, чтобы сделать выводы о целесообразности оценки литеральных задержек при локальном мониторинге ионосферы. Исходя из сравнения оцененных $DCB_{STA}^{GLO,LIT}$ и значений $DCB_{STA}^{GLO}$, полученных из файлов BSX, публикуемых IGS, можно

7 Steigenberger P., Montenbruck O. Multi-GNSS Working Group. Technical Report 2022. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://elib.dlr.de/195430/1/MGWG_2022.pdf (дата обращения: 13.07.2025).

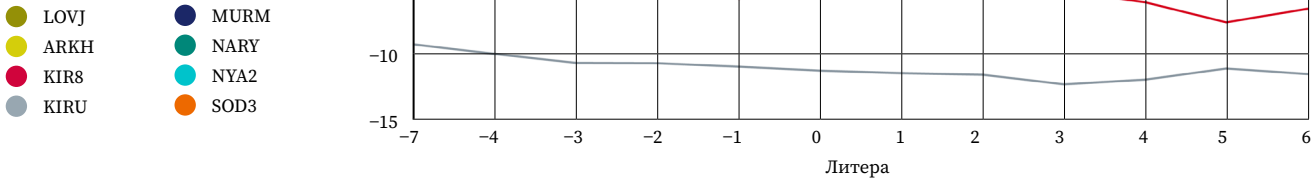
8 Bias SINEX 1.00 (December 2016) // International GNSS Service. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://igs.org/products/#differential_code_bias_2237 (дата обращения: 13.07.2025).

9 Методы моделирования ионосферы // Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://glonass-iac.ru/iono/methods/ (дата обращения: 13.07.2025).

сделать вывод, что $DCB_{STA}^{GLO} \approx DCB_{STA}^{GLO,LIT=0}$, т. е. средние значения задержки примерно соответствуют средней литере. На рис. 9 приведены графики разностей $DCB_{STA}^{GLO,LIT=i} - DCB_{STA}^{GLO,LIT=0}$, из которых следует, что расхождения для крайних литер может достигать 4 нс.

**Рис. 5**
Графики зависимости межканальных задержек ГЛОНАСС от литеры

**Fig. 5**
Graphs of the dependence of GLONASS inter-channel delays on the slot







**Примечание.** Литеры −5 и −6 отсутствуют на этом и последующих графиках, т. к. на рассматриваемый период спутников с такими литерами нет в составе орбитальной группировки ГЛОНАСС.

**Рис. 6**
Гистограмма межканальных задержек станций

**Fig. 6**
Histogram of inter-channel station delays

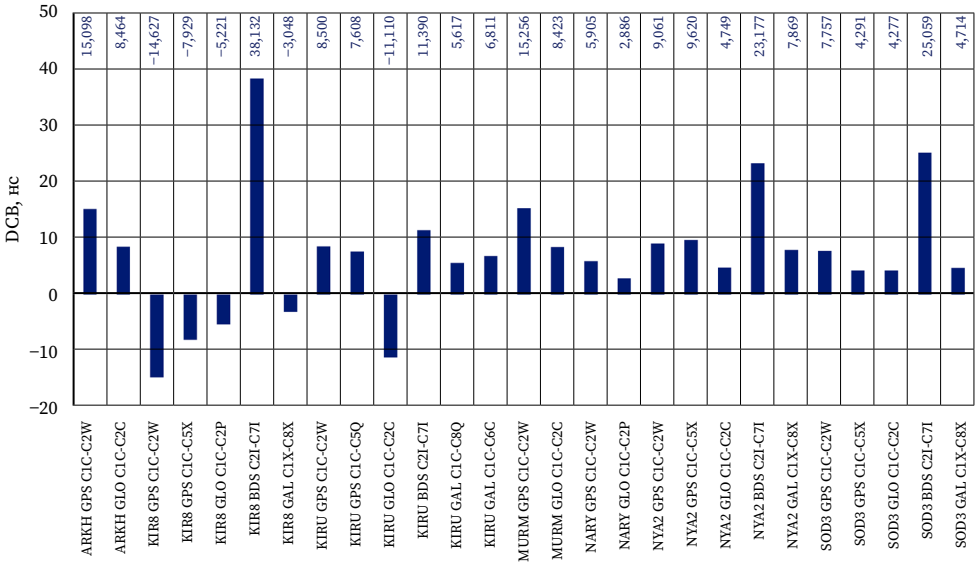



**Рис. 7**
Гистограмма СКП межканальных задержек ГЛОНАСС в зависимости от литеры

**Fig. 7**
RMS histogram of GLONASS interchannel delays depending on the slot



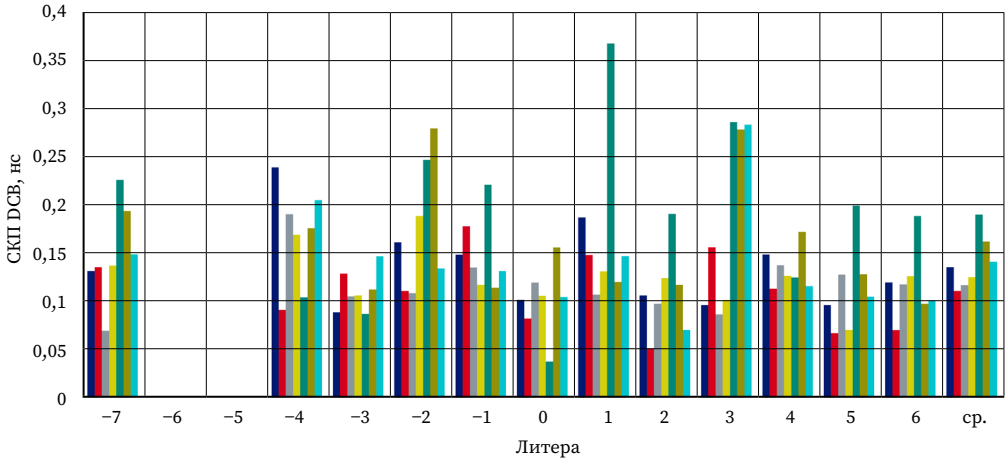



**Рис. 8**
Гистограмма СКП межканальных задержек станций по рассматриваемым парам сигналов

**Fig. 8**
RMS histogram of inter-channel station delays for the considered signal pairs

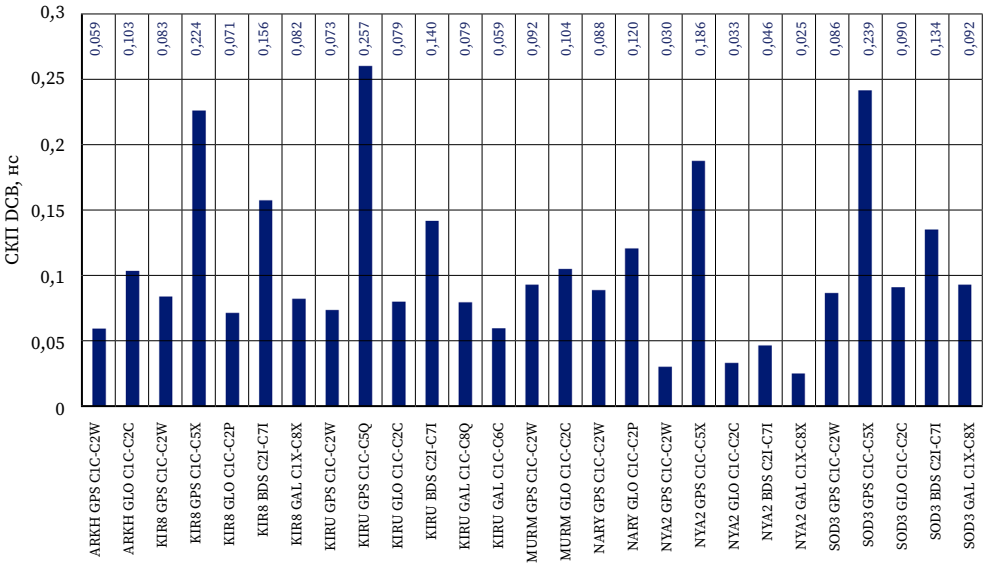
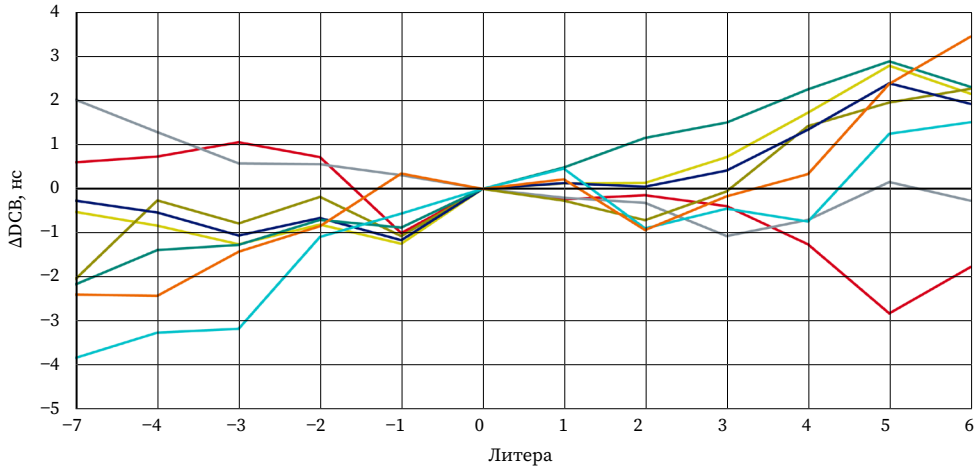



**Рис. 9**
Графики разностей межканальных задержек между литерой 0 и заданной литерой

**Fig. 9**
Graphs of channel-to-channel delay differences between the spot 0 and the given spot




Таким образом, влияние литеральных задержек на оценку TEC может быть сопоставимо с влиянием межканальных задержек как таковых (или даже превышать его), и если их игнорировать, то оценки TEC по измерениям ГЛОНАСС будут отягощены существенными систематическими погрешностями. На графиках $DCB_{STA}^{GLO,LIT=i} - DCB_{STA}^{GLO,LIT=0}$ также наблюдается зависимость (в некоторых случаях прямая, а в некоторых — обратная) литеральной задержки от номера литеры. Исходя из этого, следует рассмотреть установление функциональной зависимости между ними. На рис. 10 представлена линейная (2 параметра) и полиномиальная (4 параметра) аппроксимация ряда литеральных задержек для станции SOD3. И для этой, и для других станций достоверность линейной аппроксимации составляет порядка 77 %, а полиномиальной третьего порядка — 89 %.

Далее в соответствии с методикой были выполнены вычисление VTEC и оценка параметров локальных моделей ионосферы. По результатам вычислений получены мгновенные локальные модели ионосферы для рассматриваемой области с интервалом по времени в 30 секунд на период в 8 суток с 9 по 16 июля 2020 года. На рис. 11 приведен график зависимости VTEC от времени для центральной точки локальной области ($B = 70{,}0°$, $L = 30{,}0°$), а на рис. 12 — график СКП VTEC для той же точки, которая в среднем составила 0,12 TECU (с максимальным значением, равным 0,16 TECU). Кроме того, на рис. 12 по правой вертикальной оси приведено значение числа станций, использованных в процессе обработки для конкретных суток. Для большей части суток в рассматриваемом периоде были доступны наблюдения на всех восьми станциях, но для 15 июля была

недоступна одна станция (NYA2), а для 16 июля — две (NYA2 и KIRU). Отсутствие данных со станции NYA2 существенно не повлияло на СКП VTEC. Это объясняется тем, что эта станция наиболее удалена от области моделирования и лишь небольшая часть относящихся к ней IPP в нее попадает. Отсутствие данных со станции KIRU, находящейся в пределах области моделирования, привело к увеличению СКП VTEC на 19 %, а СКП от СКП VTEC — на 26 %.

Полученные модели представлены в виде значений VTEC, заданных в узлах регулярной сетки. Для хранения результатов использован формат IONEX. Временное разрешение полученного файла составляет 30 секунд, шаг сетки по широте и долготе равен 1°. На рис. 13 представлена визуализация результатов в виде тепловых карт VTEC в TECU на отдельные эпохи.

**Рис. 10**
Варианты линейной и полиномиальной аппроксимации

**Fig. 10**
Linear and polynomial approximation options

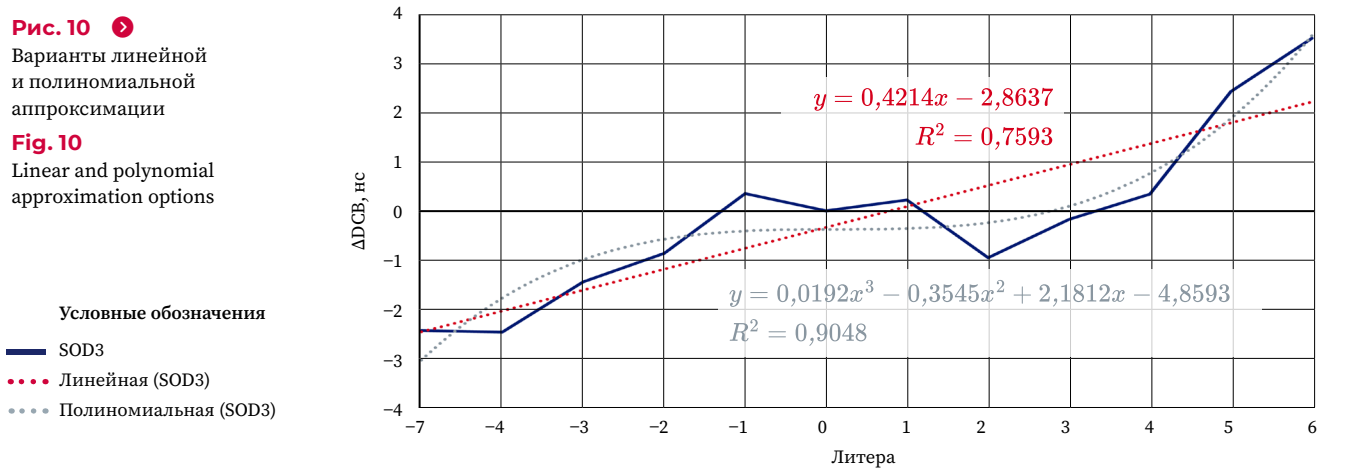



**Рис. 11**
VTEC для центральной точки модели, полученные при локальном моделировании ионосферы через EKF

**Fig. 11**
VTEC models for the central point obtained from local ionospheric modeling via EKF

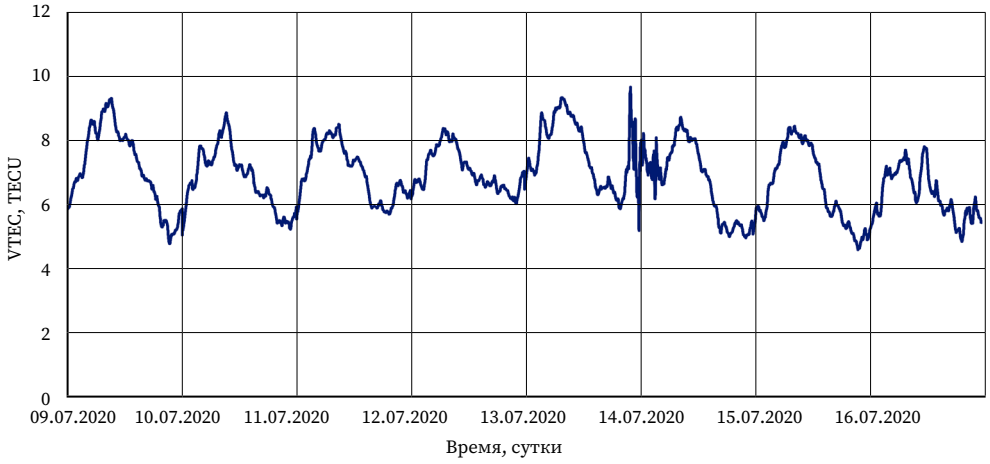



**Рис. 12**
СКП VTEC для центральной точки модели, полученные при локальном моделировании ионосферы через EKF, и количество станций, используемых при обработке

**Fig. 12**
VTEC RMS for the central point of the model obtained by local modeling of the ionosphere through EKF and the number of stations used in processing

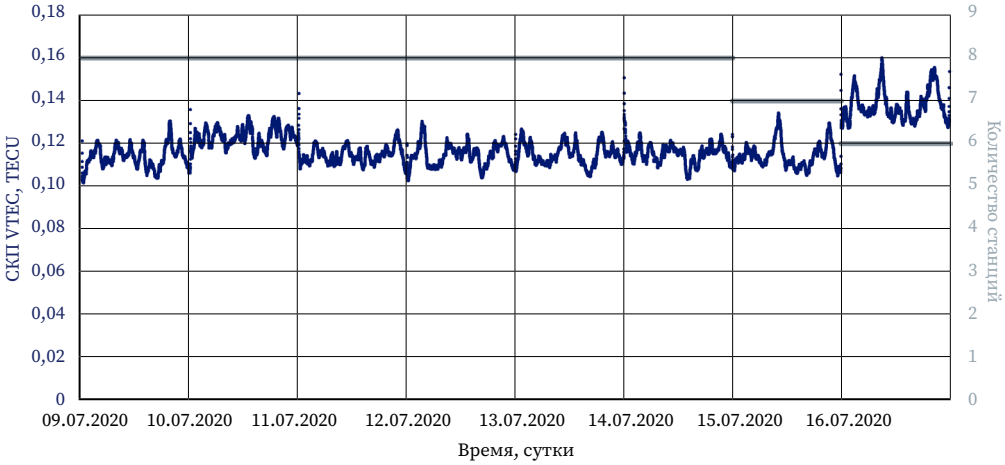
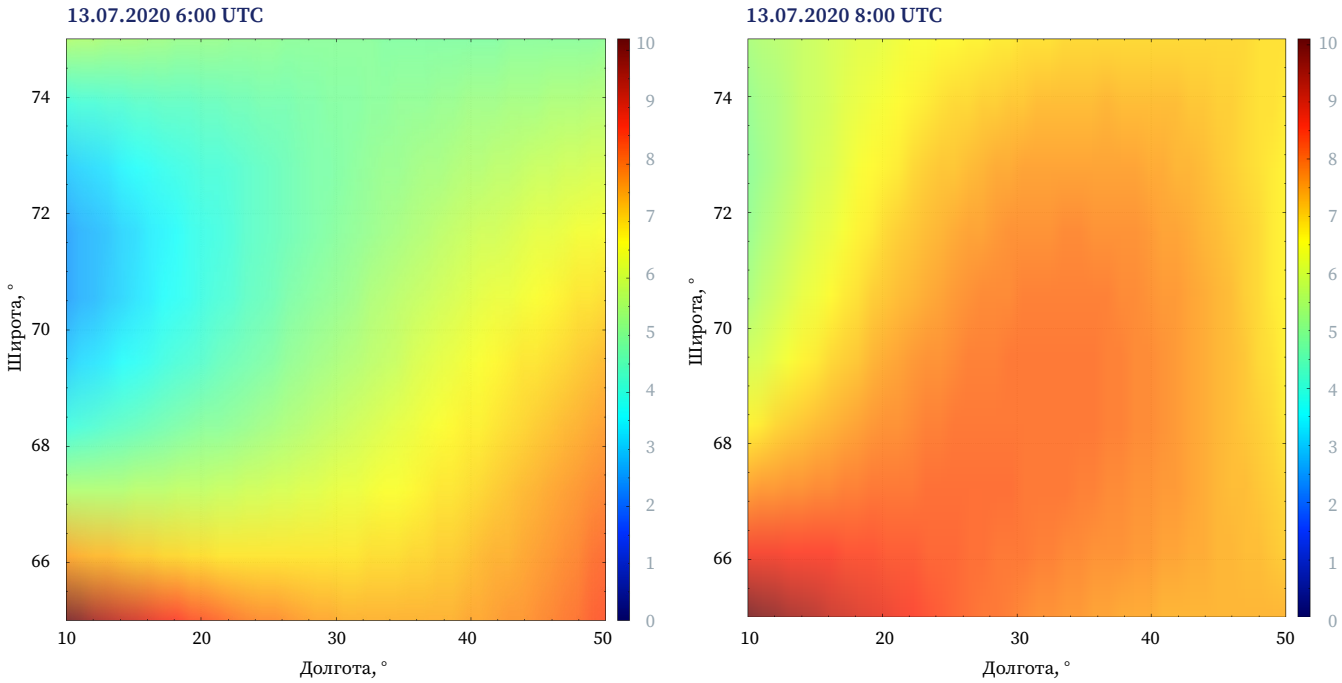


**Рис. 13**
Тепловые карты VTEC, полученные в результате локального моделирования

**Fig. 13**
VTEC heat maps obtained as a result of local modeling

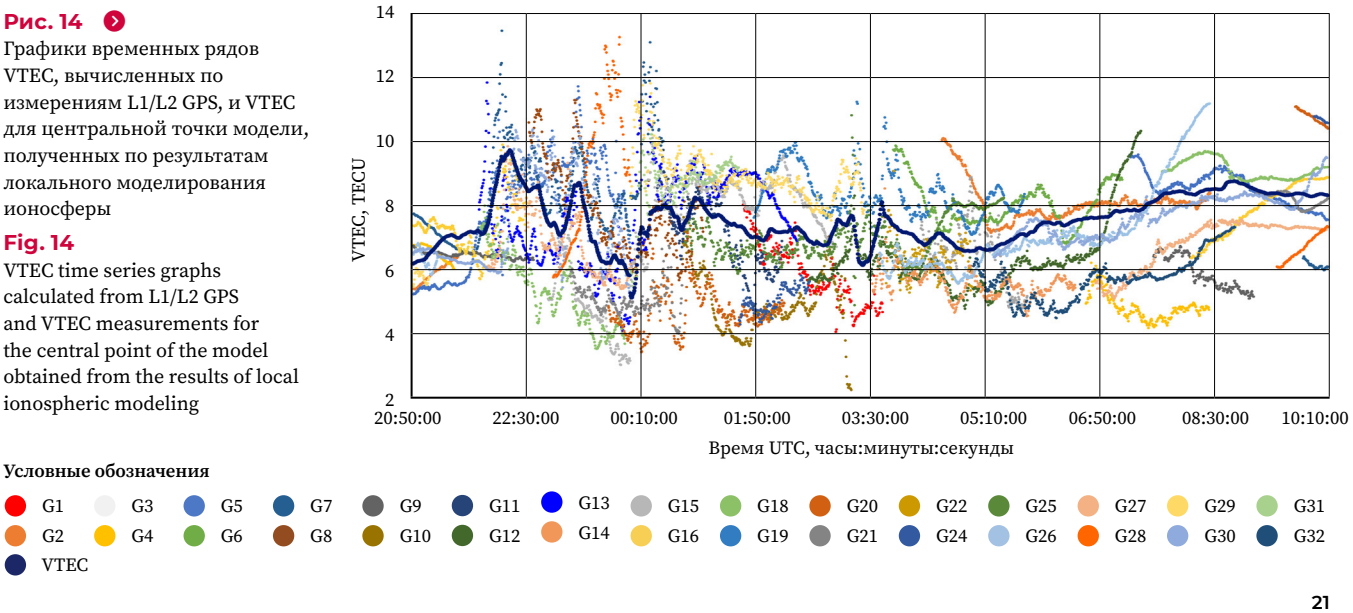



# 4 Обсуждение

На рис. 11 отчетливо наблюдается эффект резкого изменения VTEC в конце 13 июля и в начале 14 июля. Наблюдаемые возмущения были предварительно связаны с прохождением через рассматриваемую область аврорального овала. Для проверки этой гипотезы данные, полученные в период с 20:50 13 июля до 10:10 14 июля, были рассмотрены более детально, в частности построены графики зависимости VTEC от времени для каждого наблюдаемого спутника. В качестве примера на рис. 14 приведены графики временных рядов VTEC, вычисленных по измерениям L1/L2 GPS, и VTEC для центральной точки модели, полученных по результатам локального моделирования ионосферы.

**Рис. 14**
Графики временных рядов VTEC, вычисленных по измерениям L1/L2 GPS, и VTEC для центральной точки модели, полученных по результатам локального моделирования ионосферы

**Fig. 14**
VTEC time series graphs calculated from L1/L2 GPS and VTEC measurements for the central point of the model obtained from the results of local ionospheric modeling



На рисунке отчетливо видно, что резкие изменения VTEC характерны для всех наблюдаемых сигналов и не являются результатом отдельных некорректных наблюдений или несовершенства алгоритмов обработки измерений. Для других комбинаций сигналов результаты в рамках данного периода аналогичны.

Для формализации полученного результата в качестве критерия возмущенности ионосферы было выбрано среднее квадратическое отклонение VTEC, вычисленное по отклонениям от аппроксимирующей прямой на периоде в 9 эпох наблюдений. График временных рядов средних квадратических отклонений VTEC, вычисленных по измерениям L1/L2 GPS для интервала $n = 9$, приведен на рис. 15.

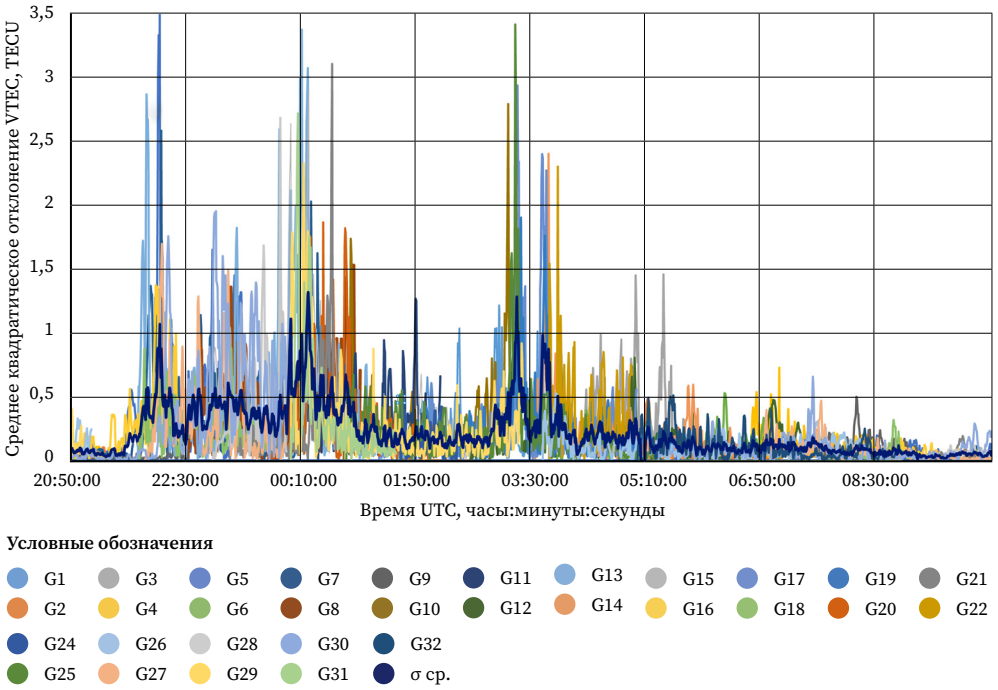



**Рис. 15**
Графики временных рядов средних квадратических отклонений VTEC, вычисленных по измерениям L1/L2 GPS для интервала $n = 9$

**Fig. 15**
Graphs of time series of VTEC mean square deviations calculated from L1/L2 GPS measurements for the interval $n = 9$

Для определения сущности наблюдаемых эффектов выполним перекрестное сравнение полученных результатов с данными космического аппарата DMSP-F18. Оборонная метеорологическая спутниковая программа (*англ.* Defense Meteorological Satellite Program, DMSP) представляет собой серию спутников на полярной орбите, предназначенных для мониторинга метеорологических, океанографических и солнечно-земных явлений с акцентом на исследования космической погоды и ионосферы. Расположенные на низкой околоземной орбите на высоте около 860 км спутники оснащены набором инструментов, включая специальный сенсор ультрафиолетового спектрографического изображения (*англ.* Special Sensor Ultraviolet Spectrograph Imagers, SSUSI) [13], который предоставляет данные для анализа ионосферы и термосферы Земли. SSUSI измеряет ультрафиолетовые излучения в различных спектральных диапазонах, таких как полосы Лаймана — Бирджа — Хопфилда (LBH) молекулярного азота, линии атомарного кислорода на длинах волн 130,4 нм и 135,6 нм, а также излучения водорода на 121,6 нм. Эти измерения позволяют создавать экологические и сенсорные записи данных, которые характеризуют параметры ионосферы, активность северного сияния и состав нейтральной атмосферы, предоставляя информацию о динамике космической погоды и вариабельности ионосферы.

Для анализа состояния ионосферы наиболее подходящими параметрами SSUSI являются УФ-излучения на длине волны 135,6 нм и LBH [13–15].

Длине волны 135,6 нм соответствует линия излучения атомарного кислорода. Это излучение возникает в результате перехода электронов в атомах кислорода между энергетическими уровнями, когда они возбуждаются в верхней атмосфере (в основном в термосфере и ионосфере, на высотах от ~50 до 750 км). Такое излучение является частью естественного свечения атмосферы, которое

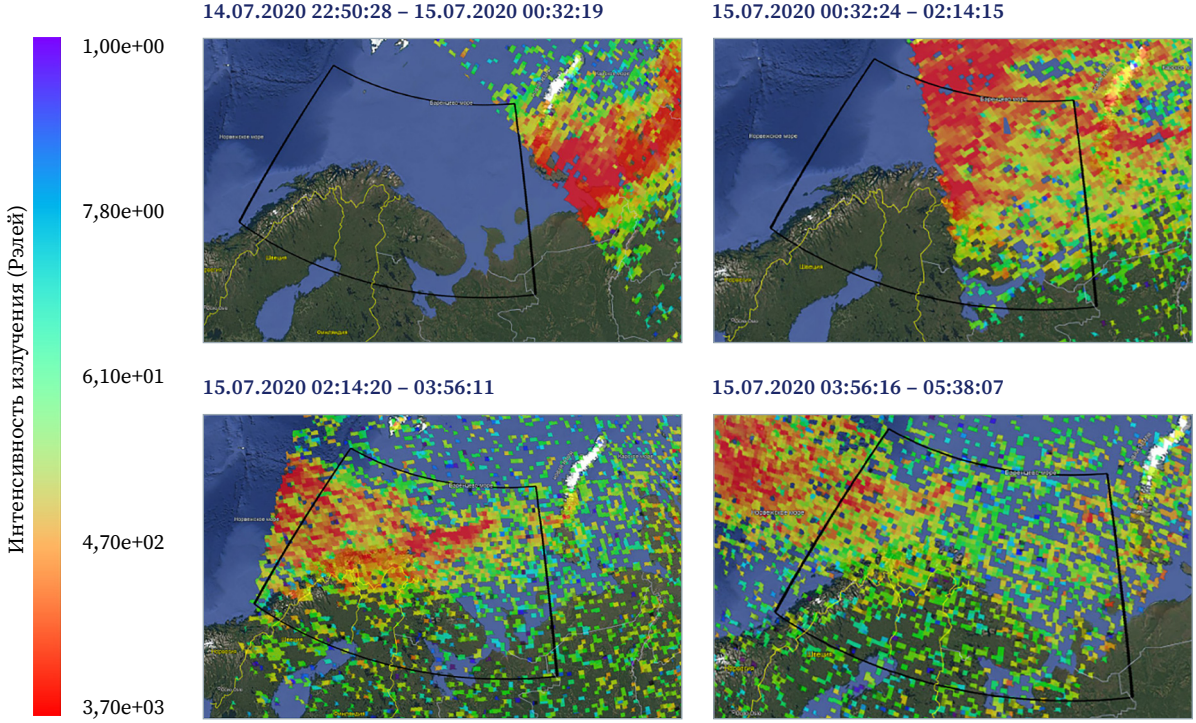
можно наблюдать как в дневное, так и в ночное время. SSUSI измеряет излучение в диапазоне от 80 до 170 нм с разрешением около 1,8 нм, и линия 135,6 нм является одной из ключевых для анализа состава и свойств ионосферы. Это излучение связано с присутствием атомарного кислорода, который преобладает в верхней атмосфере и играет важную роль в ионосферных процессах. Исходя из вышесказанного, для анализа в дальнейшем будем использовать именно УФ-излучения на длине волны 135,6 нм.

На рис. 16 приведены тепловые карты интенсивности излучении для рассматриваемой локальной области на четыре временных промежутка, построенных по данным DMSP-F18. На рисунке видно, что в рассматриваемый период авроральное возмущение ионосферы распространялось через рассматриваемую область. Из-за ограниченной ширины полосы, для которой доступны данные DMSP-F18, нельзя точно сказать, какую форму имела западная часть возмущения и как протекал процесс его вхождения в исследуемую область. При этом можно наблюдать, что выход возмущения из исследуемой области происходил постепенно с плавным уменьшением интенсивности и покрываемой площади, что соответствует данным, представленными на рис. 15, где хорошо видно, что интенсивность возмущений VTEC плавно уменьшается вплоть до 8:30 14 июля.

Данные интенсивности излучения и средних квадратических отклонений VTEC (которые косвенно характеризуют ионосферные сцинтилляции сигналов ГНСС) демонстрируют аналогичную реакцию на данное ионосферное возмущение. Это свидетельствует об эффективности представленной методики мониторинга параметров ионосферы для исследования ионосферных возмущений в полярной области.

**Рис. 16**
Тепловые карты интенсивности излучения для рассматриваемой локальной области, построенные по данным DMSP-F18

**Fig. 16**
Heat maps of radiation intensity for the local area under consideration, based on DMSP-F18 data




# 5 Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Рассматриваемая методика и технология позволяет производить локальный мониторинг параметров ионосферы в полярных областях с высокими точностью, временным (30 секунд) и пространственным (1°) разрешением.

2. Совместное использование станций ФАГС и IGS позволяет получить в некоторых районах достаточную плотность станций и, следовательно, IPP для получения локальных моделей с высокой дискретностью.
3. Оценка литеральных задержек является существенным и необходимым фактором, особенно в ситуации, когда большая часть приемников на станциях работает только по сигналам ГЛОНАСС и GPS. Использование средней межканальной задержки для всех литер приведет к существенным систематическим погрешностям VTEC.
4. В процессе прохождения аврорального возмущения вариабельность вертикального полного электронного содержания повышается в среднем в 4,9 раз.
5. Данные DMSP-F18 можно использовать как один из критериев, объясняющих авроральные возмущения, для создания эмпирической ионосферной модели в полярной области на основе рассматриваемой методики и интегрирования нейронных сетей.
6. Результаты мониторинга VTEC можно применять для определения областей, затронутых авроральными возмущениями ионосферы, и потенциально — для их картографирования.

## библиография


1. Соловьев К.В., Шайдулин З.Ф. Усовершенствованный алгоритм расчета параметров ионосферы Арктической зоны // Научная мысль. 2018. Т. 4, № 2 (28). С. 135–140.
2. Демьянов В.В., Ясюкевич Ю.В., Кашкина Т.В. и др. Экспериментальные наблюдения ускорения фазы несущей в условиях полярной ионосферы // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 10. С. 946–951. DOI:10.7868/S0033849416100089.
3. Папырин В.В., Сидоров В.К. Проблемы организации коротковолновой радиосвязи в Арктике и возможные пути их решения // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2020. № 1. С. 1–4.
4. Кулешов И.А., Солозобов С.А., Шевченко В.В. Проблемы радиосвязи в Арктике // Техника средств связи. 2018. № 3 (143). С. 21–31.
5. Кузьмичев А.П. Проблемы организации связи с труднодоступными и полярными станциями // Российские полярные исследования. 2014. № 3 (17). С. 24–27.
6. Hernández-Pajares M., Juan J.M., Sanz J., et al. The IGS VTEC Maps: A Reliable Source of Ionospheric Information since 1998 // Journal of Geodesy. 2009. Vol. 83. P. 263–275. DOI:10.1007/s00190-008-0266-1.
7. Abdelazeem M., Celik R.N., El-Rabbany A. An Enhanced Real-Time Regional Ionospheric Model Using IGS Real-Time Service (IGS-RTS) Products // Journal of Navigation. 2016. Vol. 69. Iss. 3. P. 521–530. DOI:10.1017/S0373463315000740.
8. Liu H., Ren X., Xu G. Investigating the Performance of IGS Real-Time Global Ionospheric Maps under Different Solar Conditions // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Iss. 19. P. 4661. DOI:10.3390/rs15194661.
9. Шепель В.И., Ергалиев Д.С., Тулегулов А.Д. Сравнительный анализ глобальных навигационных спутниковых систем // Надежность и качество: труды Международного симпозиума: в 2 т. Пенза: ПГУ, 2012. Т. 1. С. 469–470.
10. Wu Q., Zhang P., Sun M., et al. Performance Evaluation of Gims Released by Different IGS Ionosphere Associate Analysis Centers in Ionospheric Constrained Single-Frequency Precise Point Positioning // Advances in Space Research. 2021. Vol. 68. Iss. 12. P. 4834–4856. DOI:10.1016/j.asr.2020.12.006.
11. Montenbruck O., Hauschild A., Steigenberger P. Differential Code Bias Estimation Using Multi-GNSS Observations and Global Ionosphere Maps // Navigation. 2014. Vol. 61. No. 3. P. 191–201.
12. Gulyaeva T.L., Arikan F., Hernandez-Pajares M., et al. GIM-TEC Adaptive Ionospheric Weather Assessment and Forecast System // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2013. Vol. 102. P. 329–340.
13. Ajello J.M., Evans J.S., Veibell V., et al. The UV Spectrum of the Lyman-Birge-Hopfield Band System of $N_2$ Induced by Cascading from Electron Impact // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2020. Vol. 125. Iss. 3. P. e2019JA027546. DOI:10.1029/2019JA027546.

14. Нестеров И.А., Падохин А.М., Андреева Е.С. и др. Моделирование задачи низкоорбитальной спутниковой УФ-томографии ионосферы // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2016. № 3. С. 90–99.
15. Павлов И.А., Падохин А.М. Реконструкция региональных распределений электронной концентрации в ионосфере по разнородным данным дистанционного зондирования // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2023. Т. 45, № 4. С. 95–108. DOI:10.26117/2079-6641-2023-45-4-95-108.

## авторы

**Куприянов Андрей Олегович**
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра прикладной геодезии, геодезический факультет
канд. техн. наук, доцент
0009-0008-9222-5579

**Морозов Дмитрий Андреевич**
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра прикладной геодезии, геодезический факультет
0009-0002-1254-9095

**Замогильный Дмитрий**
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра прикладной геодезии, геодезический факультет
0009-0008-3242-1471

**Поступила 05.08.2025. Принята к публикации 20.02.2026. Опубликована 27.02.2026.**

UDC 528.01/.06
DOI:10.30533/GiA-2026-001

CC BY

# Local Monitoring of Ionospheric Parameters in the Polar Region Based on GNSS Observations

**Andrey O. Kupriyanov**[1] ✉, **Dmitry A. Morozov**[1], **Dmitry Zamogilny**[1]

[1] Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
✉ gnss@miigaik.ru

**citation** Kupriyanov AO, Morozov DA, Zamogilny D. Local Monitoring of Ionospheric Parameters in the Polar Region Based on GNSS Observations. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2026;70(1): 12–28. DOI:10.30533/GiA-2026-001.

**keywords** ionospheric parameter monitoring, local ionospheric model, polar ionosphere, total electron content, ionospheric scintillation

**abstract** The paper considers local modeling of the ionosphere in the polar region based on GNSS observations at permanent FAGS and IGS stations. The methodology of joint use of stations belonging to different networks for local monitoring of complete electronic content is presented. The results of monitoring in the area from 10° to 50° in longitude and from 65° to 75° in latitude for the time period 07/9/2020 to 07/16/2020 are presented. 8 GNSS observation stations located inside and in the vicinity of this area were used for monitoring. Local models of the spatial distribution of the vertical total electronic content in the form of Taylor series expansion parameters are obtained. The average square error for the central point of the model averaged 0.12 TECU, and the maximum value was 0.16 TECU. During the time period under review, intense ionospheric disturbances were observed, expressed in a sharp change in the total electronic content, which was previously associated with the passage of an auroral oval through the region under consideration. To confirm this hypothesis, data from the DMSP-F18 spacecraft was analyzed and it was found that during the observation period of the disturbances, the auroral oval passed directly through the region under consideration and a high intensity of disturbances was observed. It is determined that during the passage of an auroral disturbance, the variability of the vertical total electronic content increases by an average of 4.9 times.

**references**

1. Solovyov KV, Shaydulin ZF. Usovershenstvovannyi algoritm rascheta parametrov ionosfery Arkticheskoi zony [Advanced Algorithm for Calculating Ionosphere Parameters Arctic Zone]. *Nauchnaya Mysl'*. 2018;4(2(28)): 135–140. (In Russian).

2. Dem'yanov VV, Yasyukevich YuV, Kashkina TV, et al. Eksperimental'nye nablyudeniya uskoreniya fazy nesushchei v usloviyakh polyarnoi ionosfery [Experimental Observations of Carrier Phase Acceleration under Polar Ionospheric Conditions]. ***Journal of Communications Technology and Electronics.*** 2016;61(10): 946–951. (In Russian). DOI:10.7868/S0033849416100089.
3. Papyrin VV, Sidorov VK. Problemy organizatsii korotkovolnovoi radiosvyazi v Arktike i vozmozhnye puti ikh resheniya [Problems of Organization of Shortwave Radio Communications in the Arctic and Possible Ways of Their Solution]. ***Scientific and Analytical Journal "Vestnik Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia".*** 2020;1: 1–4. (In Russian).
4. Kuleshov IA, Solozobov SA, Shevchenko VV. Problemy radiosvyazi v Arktike [Problems of Radio Communication in the Arctic]. ***Means of Communication Equipment.*** 2018;3(143): 21–31. (In Russian).
5. Kuz'michev AP. Problemy organizatsii svyazi s trudnodostupnymi i polyarnymi stantsiyami [Problems of Organizing Communications with Remote and Polar Stations]. ***Russian Polar Researches.*** 2014;3(17): 24–27. (In Russian).
6. Hernández-Pajares M, Juan JM, Sanz J, et al. The IGS VTEC Maps: A Reliable Source of Ionospheric Information since 1998. ***Journal of Geodesy.*** 2009;83: 263–275. DOI:10.1007/s00190-008-0266-1.
7. Abdelazeem M, Celik RN, El-Rabbany A. An Enhanced Real-Time Regional Ionospheric Model Using IGS Real-Time Service (IGS-RTS) Products. ***Journal of Navigation.*** 2016;69(3): 521–530. DOI:10.1017/S0373463315000740.
8. Liu H, Ren X, Xu G. Investigating the Performance of IGS Real-Time Global Ionospheric Maps under Different Solar Conditions. ***Remote Sensing.*** 2023;15(19): 4661. DOI:10.3390/rs15194661.
9. Shepel' VI, Ergaliev DS, Tulegulov AD. Sravnitel'nyi analiz global'nykh navigatsionnykh sputnikovykh system [Comparative Analysis of Global Navigation Satellite Systems]. ***Reliability and Quality: Proceedings of the International Symposium.*** In 2 vols. Vol. 1. Penza: PSU; 2012: 469–470. (In Russian).
10. Wu Q, Zhang P, Sun M, et al. Performance Evaluation of Gims Released by Different IGS Ionosphere Associate Analysis Centers in Ionospheric Constrained Single-Frequency Precise Point Positioning. ***Advances in Space Research.*** 2021;68(12): 4834–4856. DOI:10.1016/j.asr.2020.12.006.
11. Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P. Differential Code Bias Estimation Using Multi-GNSS Observations and Global Ionosphere Maps. ***Navigation.*** 2014;61(3): 191–201.
12. Gulyaeva TL, Arikan F, Hernandez-Pajares M, et al. GIM-TEC Adaptive Ionospheric Weather Assessment and Forecast System. ***Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.*** 2013;102: 329–340.
13. Ajello JM, Evans JS, Veibell V, et al. The UV Spectrum of the Lyman-Birge-Hopfield Band System of $N_2$ Induced by Cascading from Electron Impact. ***Journal of Geophysical Research: Space Physics.*** 2020;125(3): e2019JA027546. DOI:10.1029/2019JA027546.
14. Nesterov IA, Padokhin AM, Andreeva ES, et al. Modelirovanie zadachi nizkoorbital'noi sputnikovoi UF-tomografii ionosfery [Modeling the Problem of Low-Orbital Satellite UV-Tomography of the Ionosphere]. ***Moscow University Physics Bulletin.*** 2016;3: 90–99. (In Russian).
15. Pavlov IA, Padokhin AM. Rekonstruktsiya regional'nykh raspredelenii elektronnoi kontsentratsii v ionosfere po raznorodnym dannym distantsionnogo zondirovaniya [Reconstruction of Regional Distributions of Electron Density in the Ionosphere from Heterogeneous Remote Sensing Data]. ***Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences.*** 2023;4: 95–108. (In Russian). DOI:10.26117/2079-6641-2023-45-4-95-108.



**authors** **Andrey O. Kupriyanov**
Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Applied Geodesy, Faculty of Geodesy
PhD in Engineering
0009-0008-9222-5579

**Dmitry A. Morozov**
Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Applied Geodesy, Faculty of Geodesy
0009-0002-1254-9095

**Dmitry Zamogilny**
Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Applied Geodesy, Faculty of Geodesy
0009-0008-3242-1471

**Submitted: August 05, 2025. Accepted: February 20, 2026. Published: February 27, 2026.**

УДК 528.01/.06
DOI:10.30533/GiA-2026-002

CC BY

# Экспериментальное исследование возможностей наземного лазерного сканирования для высокоточного мониторинга плановых смещений инженерных объектов

**С.С. Жидяев**[1]

[1] Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия
zhidyaev09@gmail.com

**цитирование** Жидяев С.С. Экспериментальное исследование возможностей наземного лазерного сканирования для высокоточного мониторинга плановых смещений инженерных объектов // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 1. С. 29–51. DOI:10.30533/GiA-2026-002.

**ключевые слова** наземное лазерное сканирование, плановое смещение, мониторинг деформаций, облако точек, алгоритм обработки данных, точность измерений, мониторинг зданий, геодезический контроль

**аннотация** Современные методы геодезического мониторинга требуют высокой точности и оперативности при выявлении деформаций инженерных сооружений. В данной статье рассматривается применение метода наземного лазерного сканирования (НЛС) для определения плановых смещений объектов. Акцент сделан на экспериментальном исследовании точности метода. Работа базируется на экспериментальных данных, полученных при моделировании деформаций и анализе последовательных циклов наблюдений на основе облаков точек. Цель исследования — оценить возможности метода НЛС в выявлении малых смещений и определить точностные характеристики. В статье представлены методология обработки облаков точек и алгоритмы анализа данных, проведены эксперименты, демонстрирующие возможность высокоточной фиксации смещений, выявлены ограничения метода НЛС, обусловленные технической спецификой прибора, а также предложены возможные пути их минимизации. Результаты исследования подтверждают перспективность использования НЛС для высокоточного мониторинга сооружений, особенно в условиях плотной застройки, где классические методы могут оказаться менее эффективными. Практическая значимость работы заключается в возможности интеграции предложенного метода в систему мониторинга деформаций инженерных объектов, таких как здания, мосты и промышленные конструкции, что позволит повысить достоверность геодезических измерений и оперативно реагировать на критические изменения конструкции.

# 1 Введение

Одной из ключевых задач строительства при возведении зданий и сооружений является обеспечение их безопасности. В этом контексте геодезический мониторинг деформаций представляет собой неотъемлемый процесс на всех этапах жизненного цикла объектов капитального строительства — от разработки котлована до эксплуатации готового сооружения [1]. Своевременное получение данных о состоянии конструкций позволяет оперативно выявлять и предотвращать критические изменения, способные негативно повлиять на безопасность объекта и окружающей его среды [2]. Современные нормативные требования в области строительства становятся все более строгими, что делает геодезический мониторинг важным инструментом контроля [3].

Традиционные методы мониторинга в геодезии основаны на жестком закреплении наблюдаемых точек [4], что требует значительных подготовительных работ и может существенно осложнять процесс измерений [5]. Особенно это актуально на этапе активных строительных работ, когда доступ к контрольным точкам может быть затруднен [6]. В условиях плотной городской застройки [7], где значительная часть новых объектов возводится в стесненной среде [8–11], даже минимальные подвижки грунта или смещения несущих элементов могут привести к серьезным последствиям [12].

В связи с этим становится актуальным рассмотрение в качестве альтернативы традиционным бесконтактных методов наблюдения, способных существенно упростить процесс измерений [13]. В отличие от традиционных способов, предполагающих жесткое закрепление пунктов мониторинга с заданной плотностью в соответствии с требованиями нормативных документов, бесконтактный метод измерения позволяет получать данные без объемных подготовительных работ. Это особенно актуально при мониторинге крупных инженерных площадных сооружений, таких как плотины [14], дамбы [15, 16], резервуары [17], тоннели [18], где установка множества контрольных точек оказывается не только трудоемкой, но и менее эффективной [19]. Однако широкое внедрение таких методов сдерживается рядом факторов, включая вопросы точности, доступности технологий и отсутствие четких нормативных регламентов.

Одним из перспективных решений, способных изменить подход к геодезическому мониторингу деформаций, является метод наземного лазерного сканирования (НЛС). Этот метод позволяет с высокой точностью фиксировать пространственное положение объектов [20], создавать трехмерные модели и анализировать их изменения с течением времени. В отличие от традиционных методов, основанных на точечных измерениях [21], лазерное сканирование предоставляет объемные данные, что значительно расширяет возможности их анализа [22]. На сегодняшний день ни один регламентированный метод в геодезическом мониторинге не позволяет предоставлять информацию в таком виде. Кроме того, полученные в результате сканирования данные могут быть интегрированы в цифровые среды, такие как технологии информационного моделирования [23], что упрощает анализ и прогнозирование деформационных процессов.

Несмотря на очевидные преимущества, данный метод пока не включен в перечень технологий, рекомендованных нормативными документами для геодезического мониторинга [24]. Это ограничивает его широкое внедрение и требует обоснования его эффективности в научно-техническом контексте [25]. Исследование данных вопросов позволит не только решить актуальные задачи, но и разработать научно обоснованные методики применения лазерного сканирования в мониторинге деформаций, включая учет влияния внешних факторов и адаптацию метода к особенностям различных типов конструкций [26].

На сегодняшний день исследования в области применения НЛС для геодезического мониторинга деформаций находятся на этапе экспериментального обоснования [27, 28] и сравнительного анализа с традиционными методами [13]. Первоначальные исследования [29] показали, что данный метод позволяет получать данные с высокой детализацией и точностью, открывая новые перспективы для контроля деформаций в реальном времени. Однако остаются нерешенными вопросы, связанные с созданием алгоритмов обработки больших

массивов данных, а также стандартизацией метода в рамках нормативных требований.

В данной статье представлено экспериментальное исследование, направленное на изучение основных аспектов развития геодезического мониторинга, включая его интеграцию с цифровыми технологиями и потенциал использования методов НЛС. Исследование проведено с учетом ключевых факторов, таких как соответствие реальным условиям, практическая применимость, а также точность и надежность получаемых данных. Этап полевых измерений позволит оценить эффективность технологии в реальных условиях с учетом воздействия внешних факторов, а также определить трудоемкость ее практического внедрения. На этапе обработки и анализа данных основное внимание уделено оценке точности и надежности полученных результатов, их сопоставлению с современными нормативными требованиями, а также анализу адаптируемости метода к практическим задачам мониторинга. Дополнительно рассмотрены возможности адаптации современных программных решений к задачам геодезического мониторинга, проведена их оценка на предмет точности и корректности выполняемых расчетов в контексте решения актуальных задач мониторинга плановых деформаций.

# 2 Материалы и методы

Данное исследование посвящено геодезическому применению приборов НЛС для отслеживания и фиксации с субмиллиметровой точностью величин деформаций (геодезический мониторинг), а также выявлению возможностей, ограничений и факторов, влияющих на точность и достоверность данного метода при его использовании в задачах геодезического мониторинга инженерных сооружений. Особое внимание уделено анализу плановых деформаций, в частности горизонтальных смещений, т. к. именно они представляют одну из ключевых проблем при мониторинге устойчивости объектов в условиях плотной городской застройки.

В рамках эксперимента были выполнены многовариантные измерения, моделирующие различные условия и сценарии эксплуатации технологии. Исследование проводилось с использованием современных моделей НЛС от различных производителей, в частности приборов Trimble TX6, Leica P40 и Faro S150. Для проверки точности и воспроизводимости данных проведены пробные измерения на испытательном стенде, что подтверждается соответствующей фотофиксацией.

Экспериментальное исследование ориентировано на практическую оценку метода НЛС в условиях реальных геодезических задач. Полученные данные позволят определить потенциальные области применения технологии, выявить возможные ограничения и оценить ее интеграцию в процессы высокоточного мониторинга.

Исследование включало три этапа:

1) подготовительный (выбор оборудования, разработка методики эксперимента, подготовка испытательного стенда и программного обеспечения);
2) экспериментальный (проведение измерений в различных условиях, моделирование сценариев возможных деформаций, сбор данных с разных приборов);
3) аналитический (обработка и анализ полученных результатов, сравнение данных с нормативными требованиями и оценка возможности адаптации метода НЛС для геодезического мониторинга инженерных сооружений).

## 2.1 Подготовительный этап

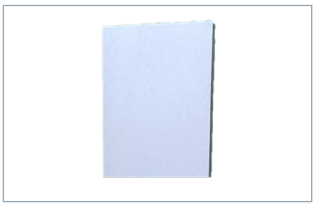
Этап подготовительных работ заключается в подборе условий, позволяющих проверить гипотезу метода и раскрыть его максимальные возможности

**Рис. 1**
Внешний вид конструкций

**Fig. 1**
Appearance of constructions

**Сборная система**

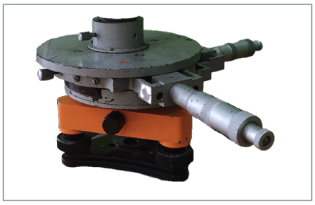
**Пластина**



**Тиски**



**Конструкция 1**



**Конструкция 2**



при применении НЛС. Важно было создать условия, максимально приближенные к реальным, чтобы достоверно оценить эффективность метода при моделировании деформаций плановых смещений.

Процесс подготовки эксперимента включал разработку методики моделирования и выбор оборудования. Предыдущие исследования подтверждают возможность применения данного метода [29], однако для получения объективных результатов требовалось создать условия, обеспечивающие детальное изучение различных факторов, влияющих на точность измерений. В частности, эксперимент должен был включать анализ большого объема измерений.

Ключевыми факторами, определяющими условия эксперимента, стали:

- используемый наземный лазерный сканер;
- расстояние между прибором и исследуемой целью (расстояние до наблюдаемой цели);
- плотность (уровень) сканирования;
- количество измеренных (наблюдаемых) циклов;
- конструкции, обеспечивающие выполнение планового смещения с фиксированной эталонной величиной;
- вид моделируемых смещений.

Для моделирования плановых смещений были использованы конструкции двух типов, внешний вид которых представлен на рис. 1. Их собранная конфигурация и расположение в составе экспериментальной установки будут рассмотрены далее при описании схемы проведения эксперимента.

Первая конструкция представляет сборную систему приборного типа, которая состоит из двух закрепленных между собой площадок, осуществляющих движение перпендикулярно друг другу. Смещение задается с помощью микрометрического винта с точностью до 0,01 мм. Конструкция позволяет закрепить ее на трегере, а также фиксировать визирную цель с помощью усовершенствованных слесарных тисков. Выбор данной конструкции обусловлен тем, что в предыдущих исследованиях [29] уже проводились эксперименты с ее использованием, что позволило подтвердить ее надежность и применимость.

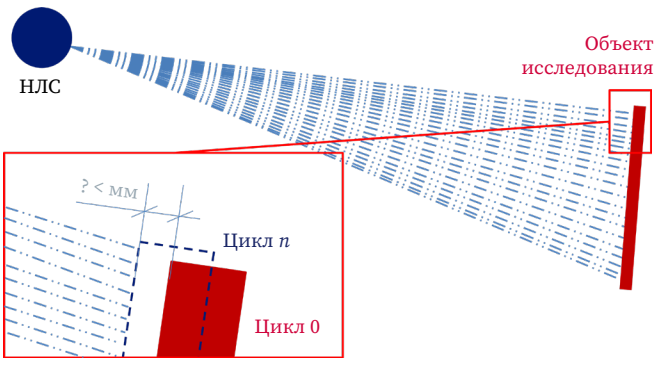
Вторая конструкция сборного вида состоит из алюминиевого каркаса, обшитого оргалитом и имеющего форму короба (параллелепипеда) размерами 100×30×100 см. В средней части лицевой стороны короба имеется сквозное отверстие размером 90×30 см, в которое встроен куб размером 30×30×30 см. Данная конфигурация позволяет моделировать деформации внутри изучаемого объекта, обеспечивая возможность движения куба вдоль и поперек отверстия. Выбор данной конструкции обусловлен тем, что поперечные смещения не удавалось корректно зафиксировать с использованием первой конструкции.

## 2.2 Экспериментальный этап

Экспериментальное исследование заключалось в выявлении потенциальных возможностей прибора (наземного лазерного сканера) при моделировании плановых деформаций. Проведенные измерения позволили определить минимально фиксируемую величину, что представлено на рис. 2. На выноске отображен фрагмент сопоставления результатов сканирования на нулевом и $n$-м цикле, где зафиксировано смещение, характеризующееся малой амплитудой. Это позволяет оценить чувствительность метода и его пригодность для задач высокоточного мониторинга.

**Рис. 2**
Схема эксперимента по измерению деформаций методом НЛС (вид сверху)

**Fig. 2**
Scheme of displacement measurement using TLS (plan view)




Реализация метода геодезического мониторинга при помощи НЛС осуществляется за счет избыточного количества измерений, по результатам которых возможно вычислить величину смещения наиболее надежно в результате детального анализа полученных данных. Проведенные измерения позволяют оценить точность фиксируемых деформаций с учетом характеристик различных приборов и условий наблюдений.

**Рис. 3**
Разложение вектора смещения на составляющие, связанные с позицией прибора (вид сверху)

**Fig. 3**
Decomposition of the displacement vector into components related to the instrument's position (plan view)

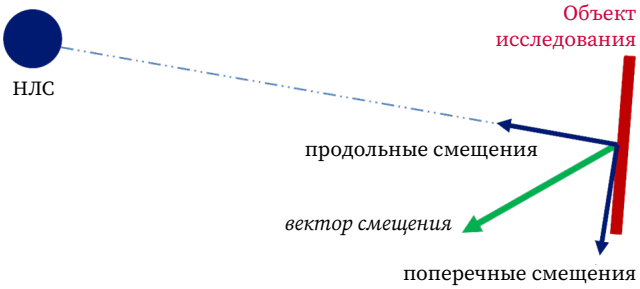
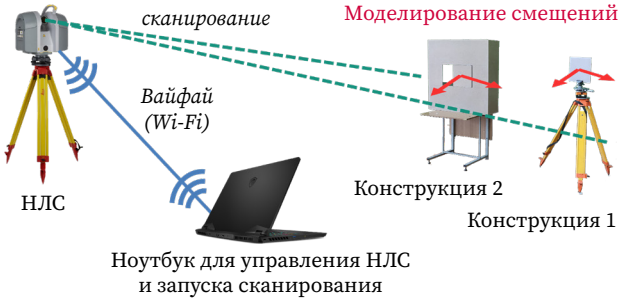



**Рис. 4**
Схема проведения эксперимента: расположение прибора и комплектующих

**Fig. 4**
Experimental setup: instrument and components arrangement




Большинство геодезических приборов и реализуемые ими методы геодезического мониторинга плановых смещений имеют свою классификацию, зависящую от нескольких факторов: технических характеристик используемого прибора, методики наблюдений и ее точности[1]. Выявление минимальных значений плановых смещений с последующей оценкой точности измерений и метода их применения позволяет представить потенциал в классификации данных приборов и используемого метода.

Плановые смещения по своему происхождению могут иметь различное направление, обусловленное воздействием нагрузочных факторов. При выполнении измерений определяемый вектор смещения, в свою очередь, зависит от положения прибора (его точки стояния). С учетом этого вектор планового смещения можно разложить на две составляющие: продольное и поперечное направления (рис. 3). Для всестороннего анализа и оценки чувствительности метода в рамках экспериментального исследования было принято решение рассматривать и моделировать оба типа смещений — как продольные, так и поперечные.

Процесс измерений представлял собой установку приборов и проведение серии сканирований с различными параметрами. В рамках эксперимента выполнено несколько этапов измерений, каждый из которых представлял собой серию отсканированных циклов. Величина шага смоделированных продольных и поперечных смещений составляла 1,0 мм.

Схема проведения этапа представлена на рис. 4. Все измерения осуществлялись в соответствии с условиями, определенными на подготовительном этапе. Исключались резкие изменения внешней среды, что обеспечивало стабильность результатов. Для устранения внешнего воздействия на устойчивость прибора и оценки возможностей использования дополнительных функций процесс измерений осуществлялся дистанционно.

По завершении подготовительных работ, включающих размещение объектов и установку прибора и конструкций в соответствии с запланированными условиями, этапы измерений проводились при статичном положении сканера. Управление прибором осуществлялось удаленно с использованием специализированного программного обеспечения через вайфай-соединение с ноутбуком, что обеспечивало постоянную устойчивость прибора к внешним воздействиям и стабильность измерений.

Последовательность действий была следующей: выполнялся цикл сканирования, затем цель вручную смещалась на заданный интервал, после чего сканирование повторялось. Такой подход позволял поэтапно моделировать плановые смещения, формируя набор облаков точек, включавший наблюдения из $n$ циклов.

1 ГОСТ 24846-2012. Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений. М.: Стандартинформ, 2014. 22 с.

**Таблица 1**
Условия проведенных этапов измерений

**Table 1**
Conditions of the measurement stages conducted

В рамках эксперимента проведено семь этапов измерений. Каждый этап представляет собой полный комплекс работ по наблюдению за деформациями в рамках геодезического мониторинга, включающий последовательность измерений, анализ точности данных и оценку стабильности результатов. Подробная информация по каждому этапу измерений со всеми условиями проведения эксперимента представлена в сводной табл. 1.

| Этап | НЛС | Расстояние до цели, м | Расстояние между соседними точками (плотность сканирования), мм | Количество циклов | Используемая конструкция | Вид моделируемых смещений |
|---|---|---|---|---|---|---|
| I | Trimble TX6 | 31 | 22,6 | 5 | 1 | Продольные |
| II | Trimble TX6 | 31 | 22,6 | 21 | 1 | Продольные, поперечные |
| III | Trimble TX6 | 31 | 11,3 | 21 | 1, 2 | Продольные, поперечные |
| IV | Trimble TX6 | 10 | 11,3 | 11 | 1 | Продольные |
| V | Leica P40 | 81 | 11,3 | 12 | 1 | Продольные |
| VI | Faro S150 | 14 | 4,4 | 5 | 1 | Продольные |
| VII | Faro S150 | 21 | 3,1 | 13 | 1 | Продольные |

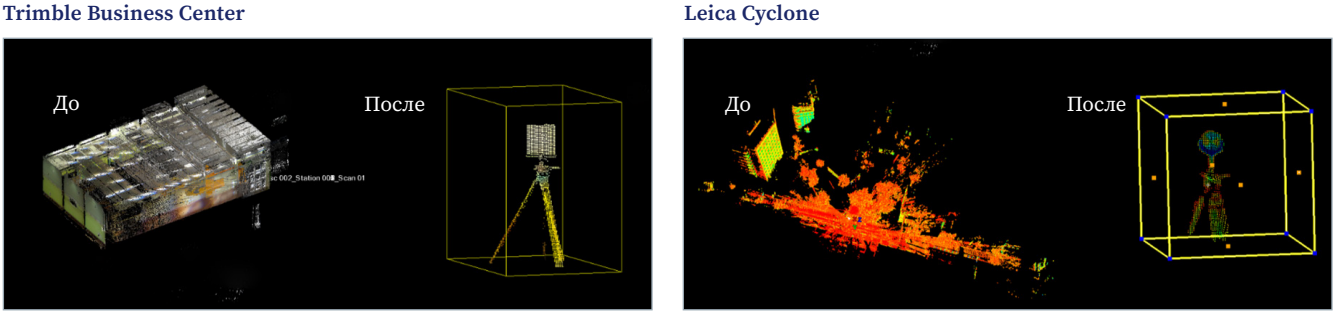
## 2.3 Аналитический этап

Процесс обработки результатов измерений выполняется поэтапно, что обеспечивает точность и корректность анализа данных. Каждый из этих этапов направлен на обеспечение достоверности полученных результатов и выявление закономерностей в поведении объекта исследования.

По результатам измерений полученные сырые данные импортируются в специализированное программное обеспечение (ПО) фирмы-производителя прибора, где проводится их предварительная обработка. На данном этапе выполняется локализация области исследования: с помощью инструментов ПО задается ограничительная рамка (рис. 5), которая позволяет выделить только зону наблюдения и исключить посторонние данные, не относящиеся к объекту исследования. Это повышает точность анализа и оптимизирует последующую обработку. На рис. 5 представлен результат данного процесса: из общего массива облака точек лазерного отражения (ТЛО) выделен фрагмент, соответствующий исследуемой области.

**Рис. 5**
Результат локализации облака

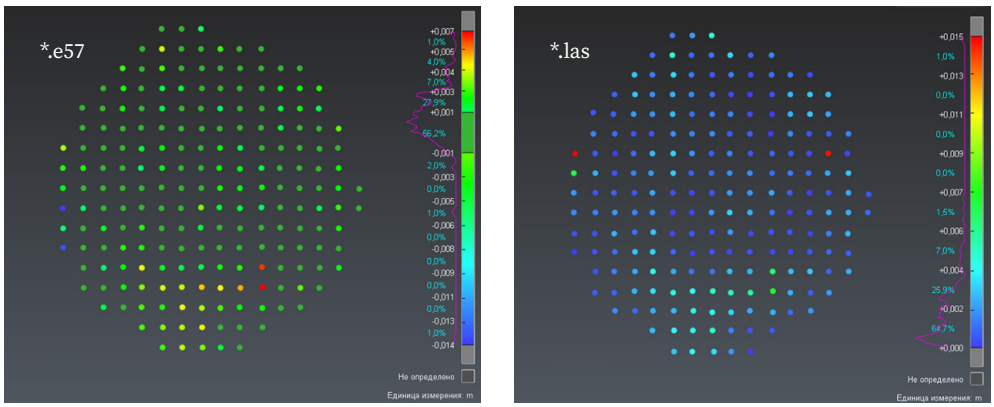
**Fig. 5**
Result of point cloud localization




После выделения соответствующей зоны облако ТЛО экспортируется в формате *.e57, выбранном на основании исследований как оптимально подходящий для задач анализа данных. В ходе обработки было выявлено, что широко применяемый альтернативный формат *.las *не* содержит всех метаданных (атрибутов), фиксируемых прибором в процессе измерений, что ограничивает его применение в задачах деформационного анализа. Сравнительный анализ этих форматов представлен на рис. 6.

**Рис. 6**
Результат анализа данных при использования форматов *.e57 и *.las

**Fig. 6**
Data analysis results using *.e57 and *.las formats



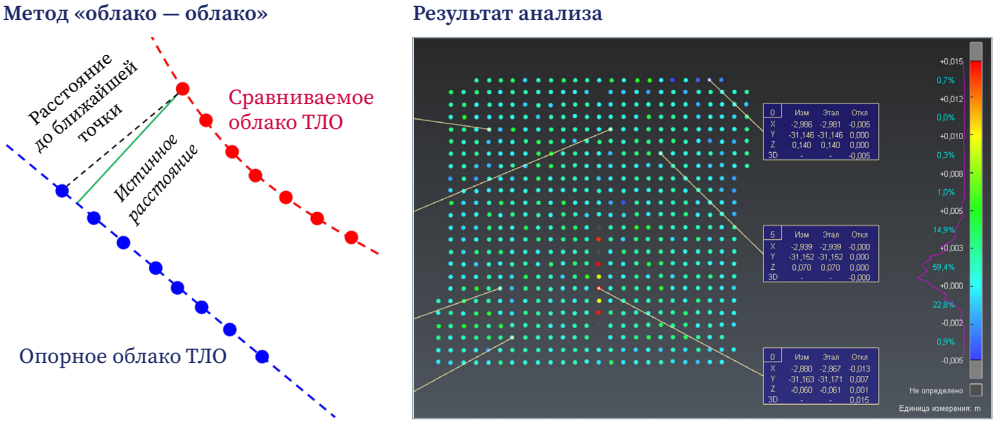

Импортированные данные анализируются в программном комплексе Leica Cyclone 3DR. На первом этапе выполняется предварительная обработка облаков ТЛО для минимизации влияния шумов на конечные результаты [30]. Шумом в данном контексте считаются отдельные точки, не соответствующие реальной поверхности объекта, возникающие в результате отражений от посторонних объектов, из-за атмосферных помех или особенностей сканирующего оборудования. Шум является одним из основных источников ошибок метода НЛС, влияя на точность измерений и последующий анализ деформаций [19]. Его высокий уровень может приводить к искажению геометрии объекта и снижению точности оценки смещений.

После устранения шумов и подготовки данных проводится сравнение циклов наблюдений методом «облако — облако» [31–33], который помогает выявить изменения в положении точек между циклами сканирования. В рамках эксперимента сравнение выполнялось между последовательными (например, 1–2, 2–3 и т. д.) и непоследовательными (например, 1–3, 3–5 и т. д.) циклами, что позволило оценить точность метода при различных величинах смещений и условиях наблюдения. Визуальная схема метода представлена в левой части рис. 7. Программное обеспечение формирует массив скалярных значений, соответствующих каждой точке облака, что дает возможность количественно оценить величину смещений. Полученные результаты сопровождаются визуализацией отклонений (правая часть рис. 7), что упрощает интерпретацию и последующий анализ данных.

Такой формат представления данных не всегда удобен. В задачах мониторинга деформаций необходимо получить конкретное числовое значение смещения, характеризующего поведение поверхности объекта. Однако при сложной геометрии исследуемой поверхности при вычислении данной величины локальные смещения могут компенсировать друг друга, что затрудняет определение истинной величины деформации. Визуальная интерпретация интервалов смещений помогает оценить их распределение, но не дает точного количественного значения. Поэтому анализ отдельных областей обеспечивает более

**Рис. 7**
Процесс реализации метода «облако — облако» и визуальное представление результатов сравнения двух циклов

**Fig. 7**
Implementation of the cloud-to-cloud method and visual representation of two-cycle comparison results



точную оценку смещений и позволяет выявить критически важные зоны, где деформации могут превышать допустимые значения. Особенно актуально это в тех случаях, когда требуется детальный контроль состояния объекта и своевременное выявление потенциально опасных изменений.

Для получения надежных значений используется усреднение смещений на единицу площади однородной поверхности. Разделение поверхности на отдельные участки и усреднение значений внутри них повышает точность оценки и снижает влияние компенсирующих деформаций.

Применение методики усреднения обусловлено невозможностью прямого анализа деформаций на основе идентичных точек. В результате измерений в двух циклах методом НЛС невозможно однозначно определить пространственное положение одних и тех же точек в разных циклах, что исключает возможность их непосредственного сопоставления [34].

В данном эксперименте визирная цель представлена одной плоскостью, что позволяет определить итоговое смещение как среднее значение множества измерений в пределах этой поверхности. Такой подход обеспечивает более точное представление распределения деформаций по объекту и минимизирует погрешности, связанные с неоднородностью смещений.

После обработки данных результаты сравнения методом «облако — облако» для каждого цикла наблюдений экспортируются в текстовом формате *.txt. В файле содержатся числовые значения смещений, представленные в виде столбца, что упрощает дальнейший анализ. Величина смещения всего облака точек определяется как среднее арифметическое значений смещений:

1 $$s_{k,m} = \frac{\sum_1^n s_i}{n},$$

где $s_{k,m}$ — среднее арифметическое значение смещений при сравнении циклов $k$ и $m$;
$\sum_1^n s_i$ — сумма смещений по результатам анализа циклов;
$n$ — количество смещений.

Поскольку моделируемые смещения задавались с фиксированным шагом –1,0 мм, это значение смещения можно принять за истинное. Оценка точности измерений проводится по следующей формуле:

2 $$m_{изм} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (s_i - S)^2}{n}},$$

где $m_{изм}$ — средняя квадратическая погрешность измерений;
$s_i$ — значение смещения по результатам анализа цикла;
$S$ — истинное значение смещения в циклах;
$n$ — количество отклонений от истины.

Завершающей стадией анализа является оценка точности применяемого метода, которая выполняется по аналогичной формуле, но с использованием уже вычисленных средних значений смещений облака данных двух последовательных циклов и непоследовательных циклов:

3 $$m_{метод} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (s_{k,m} - S)^2}{n}},$$

где $m_{метод}$ — средняя квадратическая погрешность метода;
$n$ — количество пар сравненных циклов.

Поскольку анализ смещений между циклами требует обработки большого объема данных, процесс вычислений был автоматизирован. Для этого разработана программа на языке Python, обрабатывающая экспортированные из специализированного ПО текстовые файлы, содержащие результаты сравнения циклов (значения смещений между двумя циклами), и выполняющая расчет ключевых параметров. Такой подход позволил ускорить анализ и вычисления, а также минимизировать вероятность ошибок.

В процессе обработки рассчитываются средние значения смещений, оцениваются точность измерений и достоверность полученных результатов, как показано на рис. 8. Выходные данные — номера сравниваемых циклов,

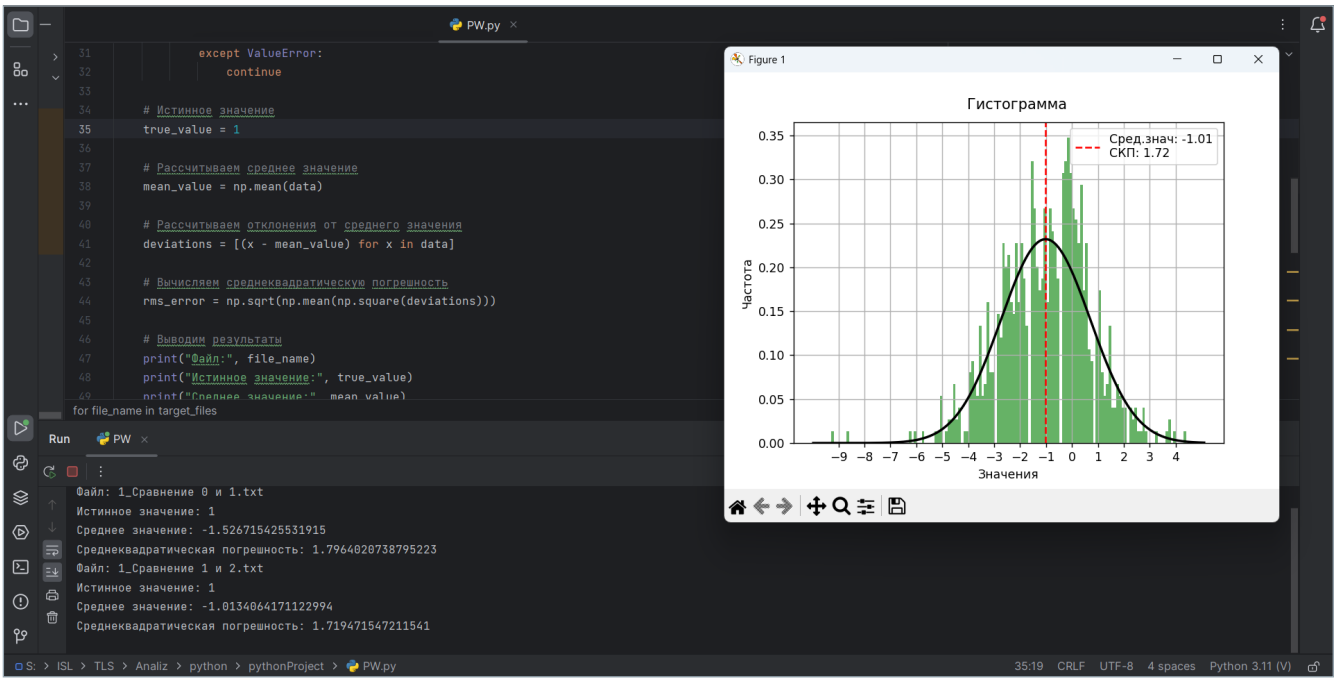
заданное (моделируемое) значение смещения, вычисленное среднее значение и среднеквадратическая погрешность (СКП) — представлены в левом нижнем углу рисунка.

Для наглядного представления результатов строится гистограмма распределения смещений (рис. 8). По оси абсцисс отложены значения смещений (в миллиметрах), по оси ординат — относительная частота их появления. Поверх гистограммы отображается кривая нормального распределения, аппроксимирующая полученные данные, что позволяет визуально оценить характер и симметричность вариаций. Вертикальная пунктирная линия указывает на среднее значение, а в правом верхнем углу графика дополнительно приводятся численные значения среднего смещения и СКП.

Представленный способ визуализации упрощает интерпретацию результатов, позволяет быстро оценить характер распределения смещений и сделать предварительные выводы о точности измерений.

**Рис. 8**
Представление результата обработки массива данных этапа измерений

**Fig. 8**
Representation of processed measurement data




# 3 Результаты и обсуждение

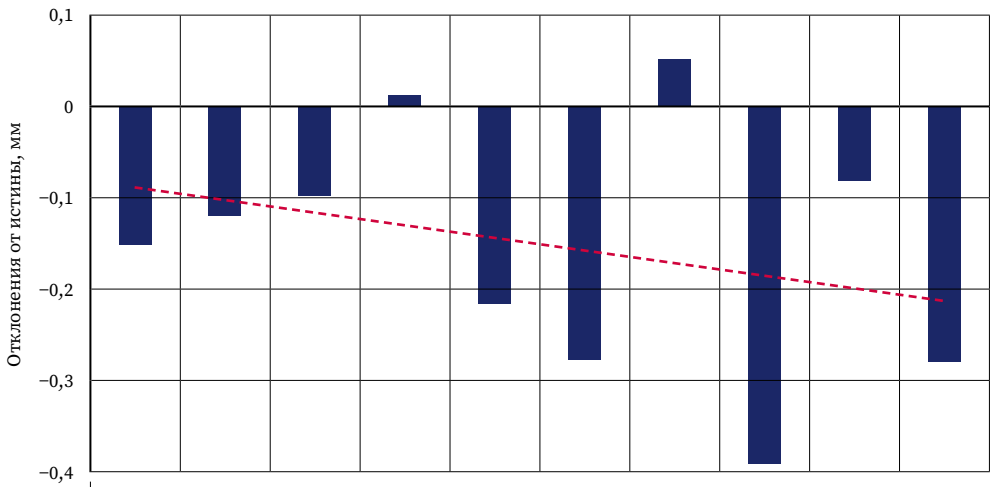
В данном разделе приведены результаты анализа продольных и поперечных смещений, полученные в ходе эксперимента. Схема, иллюстрирующая принцип определения этих смещений, представлена на рис. 3. Измерения проводились на основе условий, указанных в табл. 1. По каждому этапу вычислены средние значения смещений между последовательными и непоследовательными циклами наблюдений, а также выполнена оценка точности измерений и используемого метода. Для наглядности данные представлены в виде гистограмм и диаграмм, что позволяет проследить динамику смещений и оценить стабильность методики.

## 3.1 Анализ продольных смещений

Фиксация продольных смещений производилась на каждом этапе измерений. Результаты первого этапа, представленные на рис. 9, демонстрируют, что фиксируемые смещения соответствуют заданным значениям. Это подтверждает работоспособность методики и стабильность условий эксперимента. Данные

**Рис. 9**
Результаты анализа первого этапа сравнения продольных циклов

**Fig. 9**
Results of the first stage analysis of longitudinal cycle comparison




| № циклов | 0–1 | 1–2 | 2–3 | 3–4 | 0–2 | 1–3 | 2–4 | 0–3 | 1–4 | 0–4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ист. знач. | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 3,00 | 3,00 | 4,00 |
| сред. знач. | 0,85 | 0,88 | 0,90 | 1,01 | 1,78 | 1,72 | 2,04 | 2,61 | 2,92 | 3,72 |
| СКП изм. | 1,73 | 1,68 | 1,53 | 1,68 | 1,92 | 1,74 | 1,57 | 1,75 | 1,74 | 1,84 |

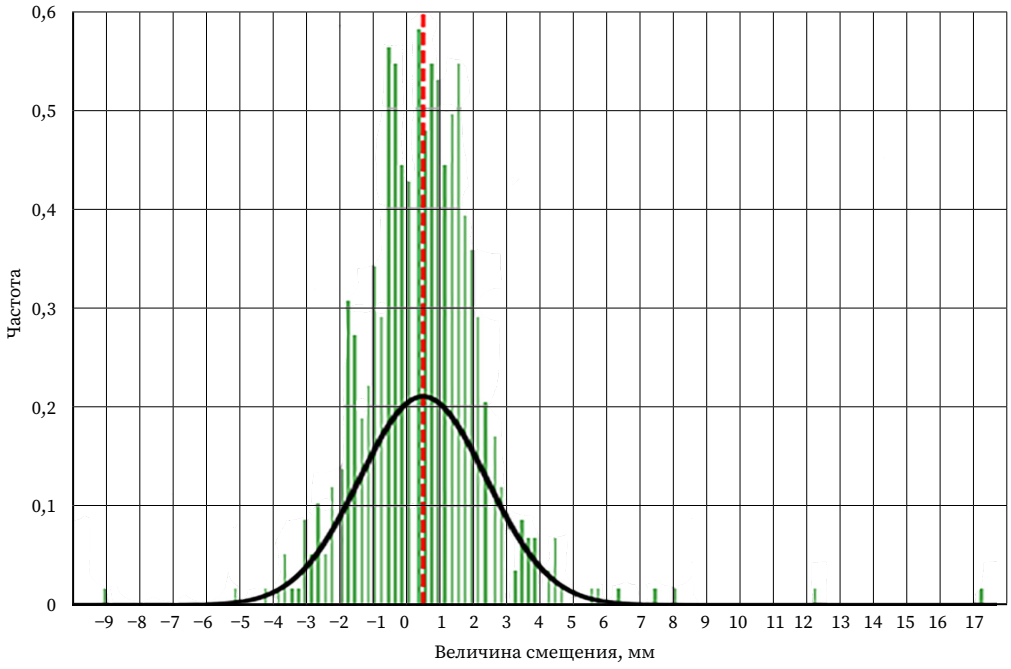
выводы послужили основанием для перехода ко второму этапу, в рамках которого дополнительно оценивалась возможность фиксации меньших интервалов.

На втором этапе, наряду с повторным анализом смещений с шагом 1 мм, было проведено дополнительное исследование, направленное на оценку возможности фиксации более малых смещений. С учетом высокой точности регистрации смещений на первом этапе часть циклов выполнялась с интервалом 0,5 мм. Результаты анализа на рис. 10 показывают, что прибор фиксирует такие малые смещения с высокой точностью.

По результатам анализа второго этапа, представленного на диаграмме (рис. 11), наблюдается значительное отклонение одной из последовательных пар циклов от истинного значения, достигающее почти половины величины смещения. Это отклонение оказывает влияние на анализ непоследовательных пар циклов, искажая общую оценку смещений.

**Рис. 10**
Гистограмма распределения смещений

**Fig. 10**
Histogram of displacement distribution

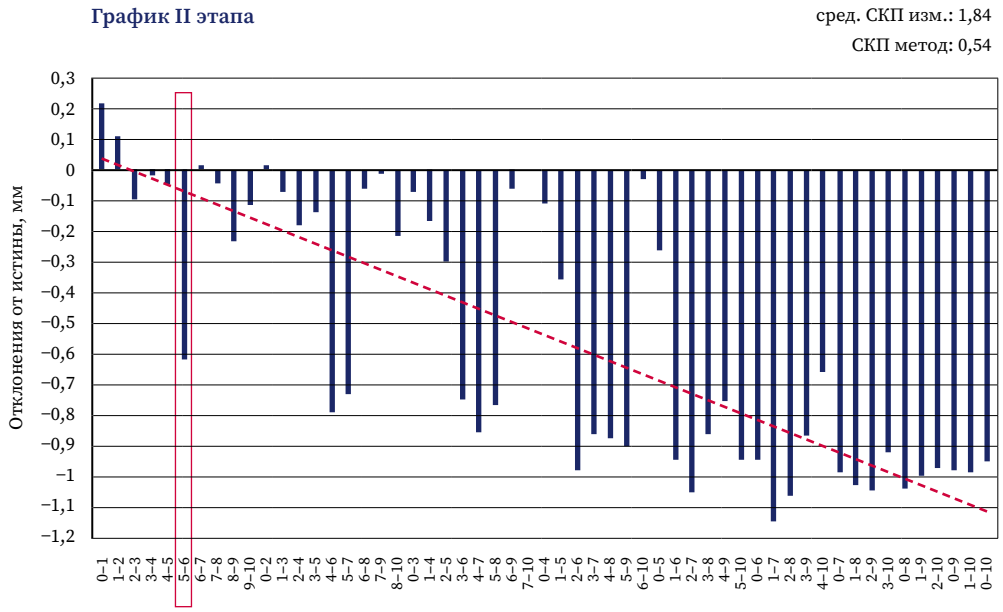



**Условные обозначения**

среднее значение — 0,51
СКП — 1,90

**Рис. 11**
Результаты анализа второго этапа продольных циклов

**Fig. 11**
Results of the second stage analysis of longitudinal cycles

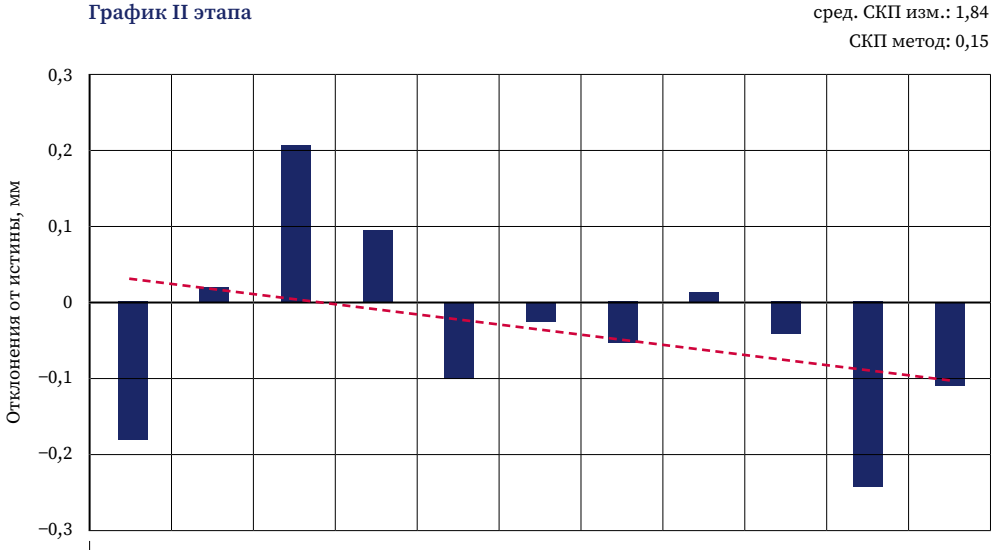



Поскольку регистрация смещений величиной 0,5 мм подтверждена, можно предположить, что выявленное отклонение обусловлено грубой ошибкой, вероятно связанной с нестабильностью движения платформы конструкции. Для минимизации данного влияния из набора данных были исключены пары циклов, содержащие проблемный интервал. Анализ скорректированных данных, представленных на рис. 12–13, показал, что после исключения аномального участка результаты соответствуют данным первого этапа, подтверждая стабильность метода.

Последующие этапы измерений (III–VII) были направлены на дополнительную проверку точности метода. Были изменены условия наблюдений (из важных основных — расстояние до наблюдаемой цели, используемая модель прибора). Результаты анализа продольных смещений на каждом этапе представлены на рис. 14–18.

**Рис. 12**
Результаты анализа второго этапа последовательных продольных циклов после исключения аномального промежутка

**Fig. 12**
Results of the second stage analysis of sequential longitudinal cycles after excluding the anomalous interval




| № циклов | 9–9,5 | 9,5–10 | 0–1 | 1–2 | 2–3 | 3–4 | 4–5 | 6–7 | 7–8 | 8–9 | 9–10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ист. знач. | 0,50 | 0,50 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| сред. знач. | 0,32 | 0,51 | 1,21 | 1,09 | 0,90 | 0,97 | 0,94 | 1,01 | 0,95 | 0,76 | 0,88 |
| СКП изм. | 1,66 | 1,90 | 1,94 | 3,39 | 1,55 | 1,71 | 1,75 | 1,62 | 1,91 | 1,80 | 1,70 |

**Рис. 13**
Результат анализа второго этапа продольных циклов после исключения аномального промежутка

**Fig. 13**
Results of the second stage analysis of longitudinal cycles after excluding the anomalous interval

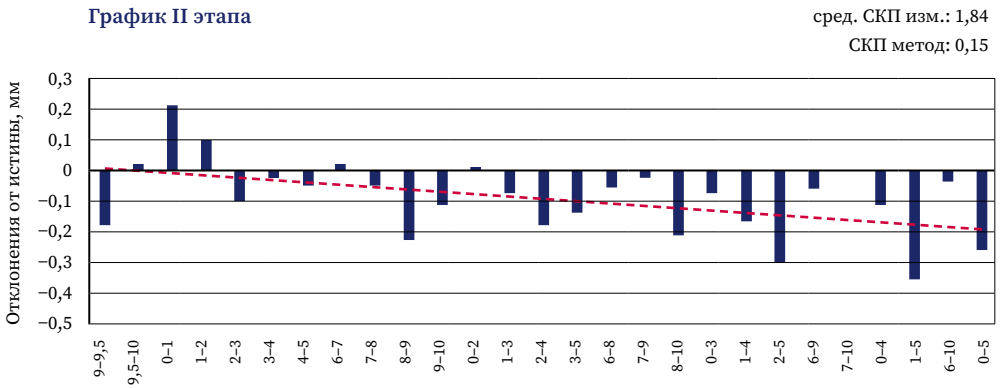
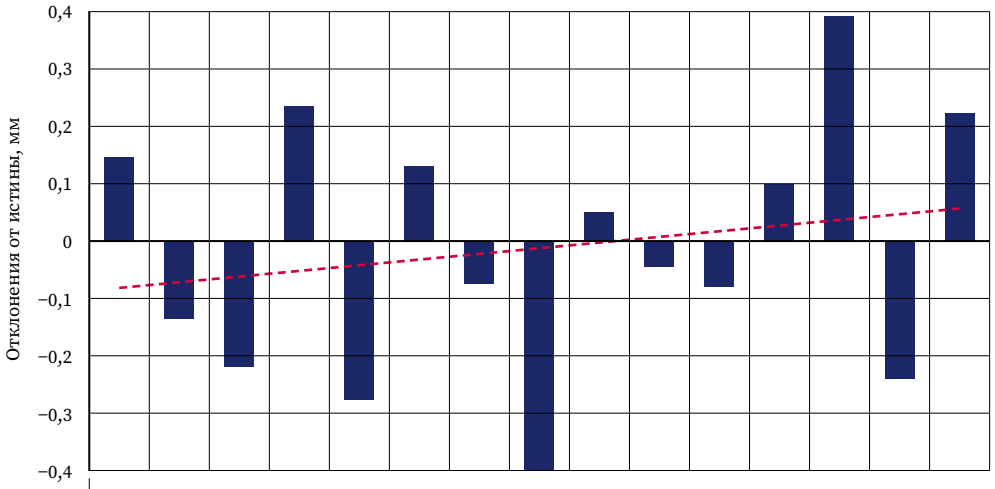



**Рис. 14**
Результаты анализа третьего этапа последовательных продольных циклов

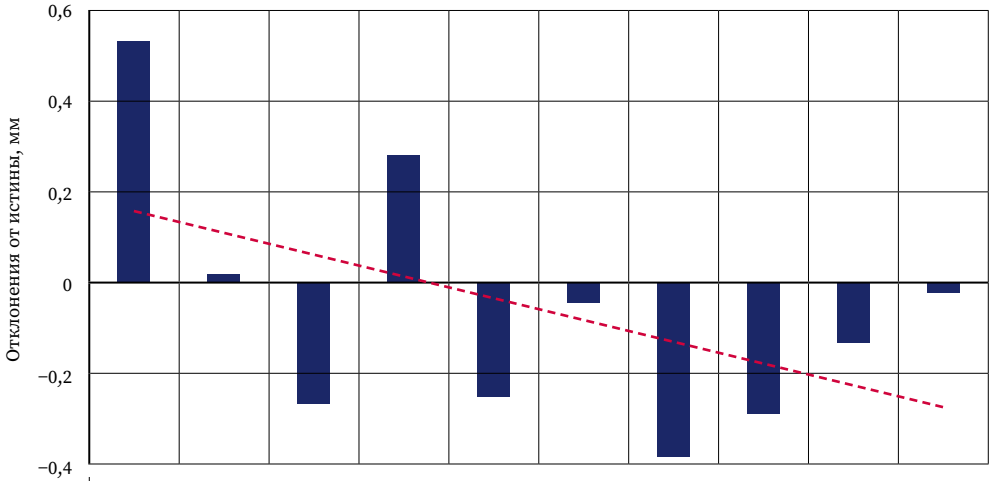
**Fig. 14**
Results of the third stage analysis of sequential longitudinal cycles




| № циклов | 0–1 | 1–2 | 2–3 | 3–4 | 4–5 | 5–6 | 6–7 | 7–8 | 8–9 | 9–10 | 10–11 | 11–12 | 12–13 | 13–14 | 14–15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ист. знач. | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| сред. знач. | 1,14 | 0,86 | 0,78 | 1,23 | 0,72 | 1,13 | 0,92 | 0,60 | 1,05 | 0,95 | 0,92 | 1,10 | 1,39 | 0,76 | 1,22 |
| СКП изм. | 2,09 | 1,48 | 1,52 | 1,75 | 1,33 | 1,60 | 1,43 | 4,02 | 4,45 | 1,40 | 1,98 | 1,58 | 1,68 | 1,63 | 1,33 |

**Рис. 15**
Результаты анализа четвертого этапа последовательных продольных циклов

**Fig. 15**
Results of the fourth stage analysis of sequential longitudinal cycles



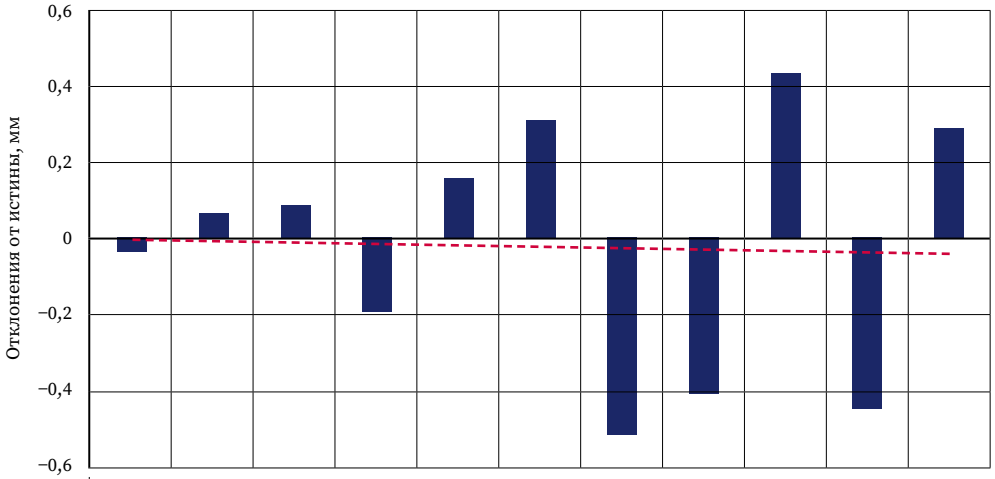

| № циклов | 0–1 | 1–2 | 2–3 | 3–4 | 4–5 | 5–6 | 6–7 | 7–8 | 8–9 | 9–10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ист. знач. | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| сред. знач. | 1,53 | 1,01 | 0,73 | 1,28 | 0,74 | 0,95 | 0,61 | 0,71 | 0,86 | 0,97 |
| СКП изм. | 1,80 | 1,72 | 2,00 | 1,85 | 1,81 | 1,81 | 1,68 | 1,62 | 1,61 | 1,94 |

**Рис. 16**
Результаты анализа пятого этапа сравнения продольных циклов

**Fig. 16**
Results of the fifth stage analysis of longitudinal cycle comparison

**График V этапа**

сред. СКП изм.: 1,26
СКП метод: 0,45



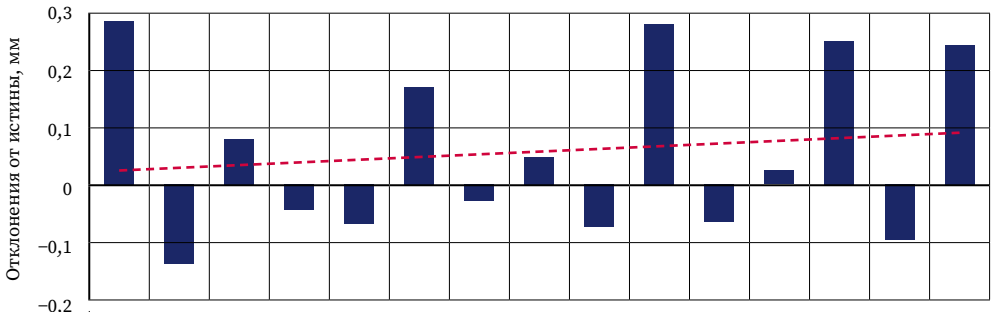

| № циклов | 0–1 | 1–2 | 2–3 | 3–4 | 4–5 | 5–6 | 6–7 | 7–8 | 8–9 | 9–10 | 10–11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ист. знач. | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| сред. знач. | 0,97 | 1,07 | 1,09 | 0,81 | 1,16 | 1,32 | 0,49 | 0,60 | 1,44 | 0,55 | 1,29 |
| СКП изм. | 1,01 | 0,88 | 1,02 | 1,13 | 1,00 | 1,00 | 1,15 | 2,39 | 1,02 | 0,88 | 1,17 |

**Рис. 17**
Результаты анализа шестого этапа сравнения продольных циклов

**Fig. 17**
Results of the sixth stage analysis of longitudinal cycle comparison

**График VI этапа**

сред. СКП изм.: 0,37
СКП метод: 0,16



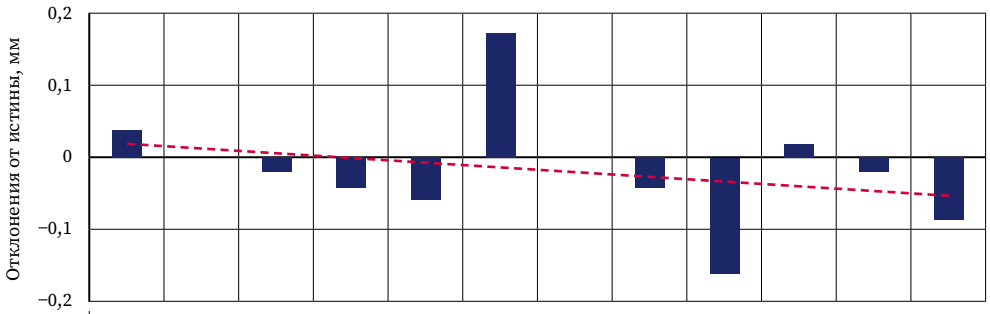

| № циклов | 0–1 | 1–2 | 2–3 | 3–4 | 4–5 | 0–2 | 1–3 | 2–4 | 3–5 | 0–3 | 1–4 | 2–5 | 0–4 | 1–5 | 0–5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ист. знач. | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 4,00 | 4,00 | 5,00 |
| сред. знач. | 1,28 | 0,86 | 1,08 | 0,96 | 0,93 | 2,17 | 1,97 | 2,05 | 1,93 | 3,28 | 2,94 | 3,03 | 4,25 | 3,91 | 5,25 |
| СКП изм. | 0,52 | 0,31 | 0,28 | 0,29 | 0,29 | 0,44 | 0,30 | 0,30 | 0,33 | 0,49 | 0,33 | 0,35 | 0,48 | 0,35 | 0,53 |

**Рис. 18**
Результаты анализа седьмого этапа последовательных продольных циклов

**Fig. 18**
Results of the seventh stage analysis of sequential longitudinal cycles

**График VII этапа**

сред. СКП изм.: 0,49
СКП метод: 0,08




| № циклов | 0–1 | 1–2 | 2–3 | 3–4 | 4–5 | 5–6 | 6–7 | 7–8 | 8–9 | 9–10 | 10–11 | 11–12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ист. знач. | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| сред. знач. | 1,04 | 1,00 | 0,98 | 0,96 | 0,94 | 1,17 | 1,00 | 0,96 | 0,84 | 1,02 | 0,98 | 0,91 |
| СКП изм. | 0,42 | 0,46 | 0,42 | 0,34 | 0,42 | 1,42 | 0,28 | 0,33 | 0,43 | 0,39 | 0,58 | 0,34 |

Для обобщенной оценки точности метода вычислены средние значения СКП измерений и самого метода. Итоговые данные сведены в табл. 2.

**Таблица 2**
Результаты анализа продольных смещений по каждому этапу

**Table 2**
Results of the analysis of longitudinal displacements for each stage

| Этап | Среднее значение СКП измерений $m_{сред.изм}$, мм | СКП метода $m_{метод}$, мм |
|---|---|---|
| I | 1,72 | 0,20 |
| II | 1,84 | 0,15 |
| III | 1,86 | 0,41 |
| IV | 1,93 | 0,47 |
| V | 1,26 | 0,45 |
| VI | 0,37 | 0,16 |
| VII | 0,53 | 0,09 |

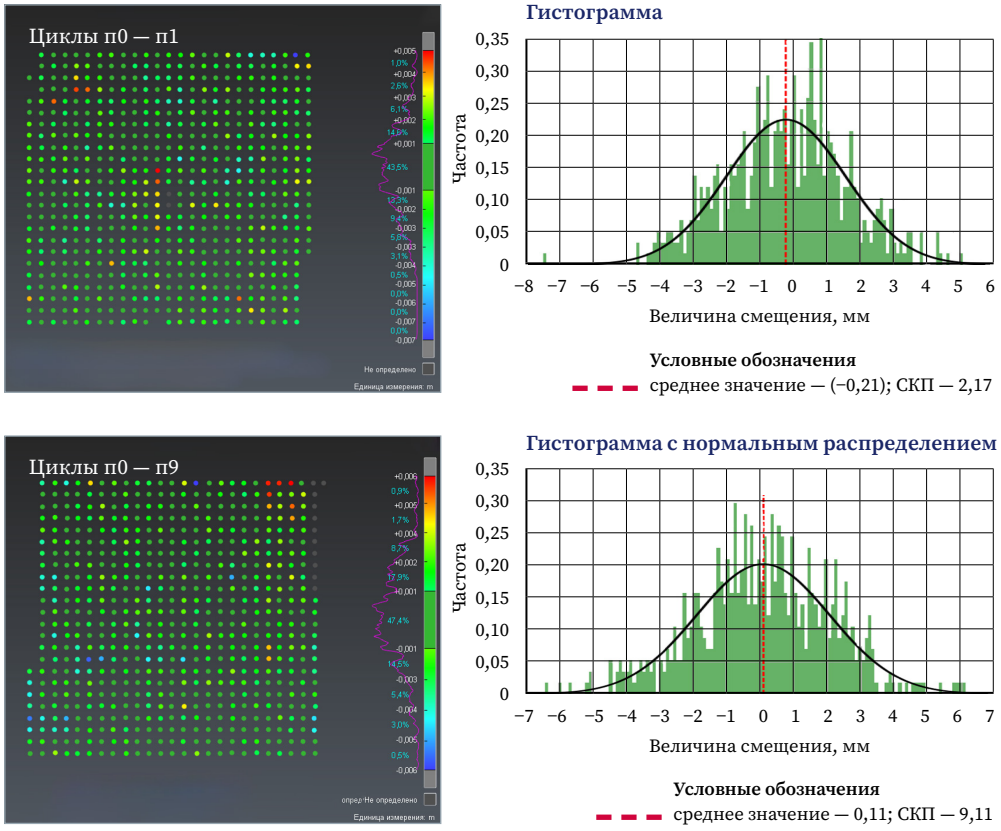
## 3.2 Анализ поперечных смещений

Измерение поперечных смещений проводилось на втором и третьем этапах эксперимента. На втором этапе анализ поперечных смещений показал, что при сравнении последовательных циклов (а также начального и конечного) величина поперечных смещений равна нулю, что указывает на неспособность метода выявить поперечные смещения.

Поскольку движение наблюдаемой цели происходило исключительно в поперечном направлении относительно НЛС, данный результат подтверждает неизменность наблюдаемой цели в продольном направлении, что отражают гистограммы, представленные на рис. 19. Небольшие отклонения от нулевого значения объясняются различными погрешностями измерений, основным источником которых является шум. Таким образом, полученные результаты указывают на то, что алгоритмы обработки данных методом «облако — облако», используемые в ПО, не позволяют зафиксировать поперечные смещения в явном виде.

**Рис. 19**
Результат анализа поперечных смещений второго этапа

**Fig. 19**
Result of the second stage transverse displacement analysis

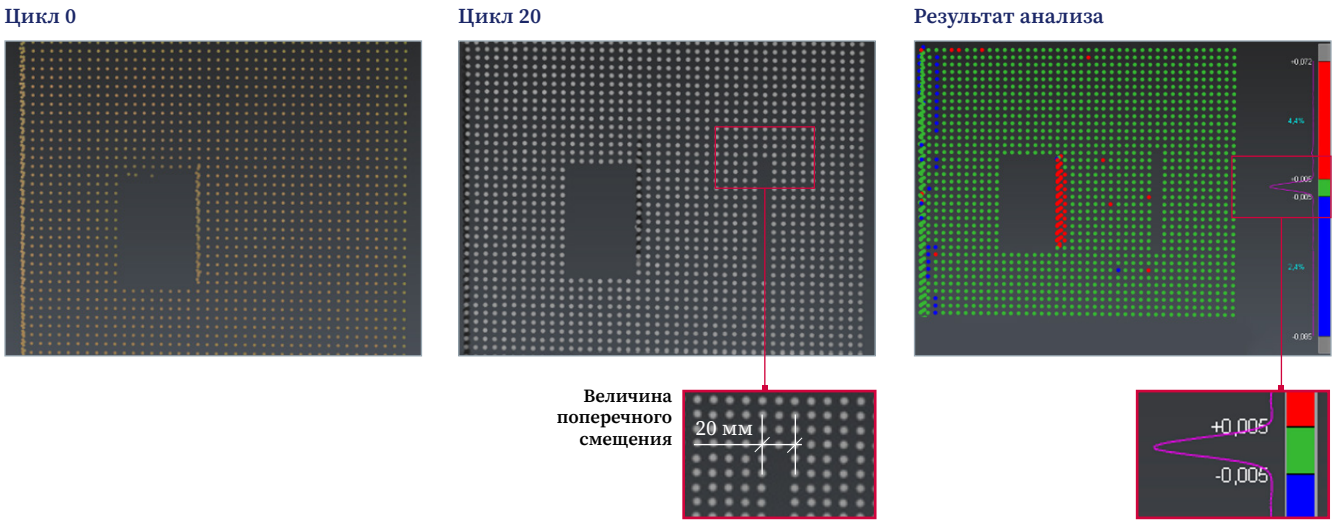


На третьем этапе была предпринята попытка выявления поперечных смещений при иных условиях, т. к. на предыдущем этапе их регистрация оказалась невозможной. В связи с этим была выдвинута гипотеза о том, что алгоритмы ПО не могут корректно определить границы облаков точек при их сравнении, и это препятствует фиксации поперечных смещений. Для проверки гипотезы предложено использовать опорные участки, положение точек которых остается неизменным во время измерений, тогда как деформации происходят внутри исследуемого объекта [35]. Такая конфигурация была реализована с помощью конструкции 2, представляющей собой стенд, моделирующий деформации внутри исследуемого объекта.

Результаты анализа показали, что, несмотря на наличие опорных участков, метод сравнения «облако — облако» не позволяет явно зафиксировать поперечные смещения. Это подтверждается как данными диаграммы, так и визуальным анализом результатов. На рис. 20 представлены облака точек для циклов 0 и 20, а также результат их сравнения. Основная масса точек, включая как опорные, так и деформируемые участки, окрашена в зеленый цвет, что соответствует смещениям, близким к нулю, указывая на отсутствие поперечного смещения. Тем не менее при визуальном рассмотрении модели отчетливо прослеживается щель внутри объекта, указывающая на наличие поперечного смещения, не отраженного в численных результатах.

**Рис. 20**
Результат анализа поперечных смещений третьего этапа

**Fig. 20**
Result of the third stage transverse displacement analysis




Таким образом, даже при использовании опорных участков с неизменным положением точек проблема корректного выявления поперечных смещений остается нерешенной. Это указывает на ограниченность метода «облако — облако» в условиях поперечных деформаций, вероятно обусловленную невозможностью однозначной фиксации границы исследуемого объекта. Указанное ограничение свидетельствует о необходимости дальнейшего совершенствования методики анализа.

# 4 Выводы

Проведенное исследование продемонстрировало эффективность применения метода НЛС для определения плановых смещений объектов. Анализ результатов позволил не только подтвердить работоспособность метода, но и выявить его особенности, определить точность, а также оценить влияние условий измерений на полученные данные.

Важным аспектом исследования стала ориентация вектора деформации относительно положения прибора, что позволило разложить плановые смещения на продольную и поперечную составляющие. Это дало возможность провести

более детальный анализ особенности метода и его эффективности в зависимости от направления смещений. Анализ продольных смещений подтвердил высокую точность фиксации: среднеквадратическая ошибка их определения составила 0,3 мм, что значительно превосходит допустимую погрешность[2] измерений горизонтальных смещений I класса — 2 мм. Такой результат подтверждает высокий потенциал метода для задач геодезического мониторинга.

В то же время выявлена ключевая проблема — невозможность корректного выявления поперечных смещений. Несмотря на наличие фактических изменений в положении объекта, современные алгоритмы анализа облаков точек их явно не фиксируют. Предположение о влиянии неопределенности границ облаков точек подтвердилось: даже при наличии опорных участков с неизменным положением результаты анализа оставались такими же. Это указывает на ограниченность метода сравнения «облако — облако» при анализе поперечных деформаций и подчеркивает необходимость разработки новых алгоритмов, способных учитывать особенности такого рода смещений.

Достигнутая точность метода определяется рядом факторов, включая направление приложенной нагрузки, вектор смещения конструкции, положение прибора, расстояние до объекта и плотность сканирования. Установлено, что точность определения деформаций напрямую связана с плотностью точек на единицу площади, а значит, с расстоянием до объекта: с его увеличением плотность точек уменьшается, что негативно сказывается на точности фиксации смещений. Важно также отметить, что при изменении положения сканера между циклами сканирования возникает ошибка взаимной ориентации облаков точек, способная повлиять на точность оценки деформаций. Влияние этой погрешности на результаты анализа представляет собой отдельную исследовательскую задачу и требует дальнейшего изучения. В рамках настоящего исследования положение сканера оставалось неизменным, что позволило исключить влияние данной ошибки. В связи с этим для получения сопоставимых по качеству результатов при практическом применении метода рекомендуется сохранять фиксированное положение сканера между циклами сканирования.

В геодезическом мониторинге каждый класс точности имеет регламентированные требования к допустимой погрешности измерений, поэтому возникает задача количественного определения соответствующей заданному классу зависимости между плотностью точек и расстоянием до объекта. Установление такой зависимости позволит заранее рассчитывать требуемую плотность сканирования, адаптируя методику под конкретные условия мониторинга. Это повысит практическую применимость метода и обеспечит достижение требуемой точности при оптимальных параметрах съемки.

Метод НЛС обладает высоким потенциалом в геодезическом мониторинге, особенно при контроле деформаций в замкнутых пространствах — тоннелях метро, котлованах, подземных переходах и других инженерных сооружениях. В таких условиях можно обеспечить стабильное положение прибора и высокую плотность сканирования, что особенно важно для точной фиксации смещений. Внутренний замкнутый контур объекта обеспечивает преимущество: смещения, как правило, имеют продольный характер, что упрощает интерпретацию результатов и исключает необходимость разложения вектора деформаций на компоненты.

В то же время метод может быть успешно адаптирован и для мониторинга объектов с внешним контуром — при условии, что сканирование выполняется с нескольких сторон, обеспечивая полное перекрытие поверхности. Такой подход позволяет эффективно учитывать сложные случаи деформаций, включая поперечные и комбинированные смещения, тем самым расширяя применимость метода в различных условиях и повышая его универсальность.

2 ГОСТ 24846-2012. Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений. М.: Стандартинформ, 2014. 22 с.

## библиография


1. Кирюникова Н.М., Лесовая Н.М., Гура Д.А. Геодезический мониторинг как средство наблюдения за состоянием объектов инфраструктуры // Современные проблемы и перспективы развития земельно-имущественных отношений: сборник статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции. Краснодар: КубГАУ, 2020. С. 390–395.
2. Ханнанов Р.Р., Михнев А.В. Геодезический мониторинг состояния ограждающей дамбы № 1 золоотвала ТОО «ГРЭС Топар» по методике наземного лазерного сканирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Международный научный конгресс: сборник материалов в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2022. Т. 1. С. 13–18. DOI:10.33764/2618-981X-2022-1-13-18.
3. Галиев И.Х., Ибрагимов Р.А., Ашрапов А.Х. Возможности 3D сканеров при мониторинге реконструируемых зданий // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы IV Международной научно-практической конференции (21–23 апреля 2021 г.). СПб.: СПбГАСУ, 2021. С. 274–281. DOI:10.23968/BIMAC.2021.035.
4. Wu C., Yuan Y., Tang Y., et al. Application of Terrestrial Laser Scanning (TLS) in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry // Sensors. 2022. Vol. 22. Iss. 1. P. 265. DOI:10.3390/s22010265.
5. Ханнанов Р.Р. Лазерное сканирование для определения деформаций насыпных дамб // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIX Международный научный конгресс: сборник материалов в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2023. Т. 1, № 1. С. 149–153. DOI:10.33764/2618-981X-2023-1-1-149-153.
6. Шоломицкий А.А., Лагутина Е.К., Соболева Е.Л. Применение лазерного сканирования для мониторинга большепролетных сооружений // Вестник СГУГиТ. 2018. Т. 23, № 2. С. 43–57.
7. Мурсалимова Э.А., Бажирова Г.К., Сейтказы А.К. Геодезический контроль процесса деформации высотных сооружений с использованием технологии наземного лазерного сканирования // The Scientific Heritage. 2022. № 101. С. 28–34. DOI:10.5281/zenodo.7340757.
8. Васильева М.Д. Проблема строительства в стесненных условиях городской среды (застройки) // Инновационные методы организации строительного производства: материалы II Всероссийской научно-практической конференции (17–18 ноября 2022 г.). СПб.: СПбГАСУ, 2023. С. 78–84.
9. Мамченков В.Д. Особенности строительства в условиях плотной городской застройки // Молодой ученый. 2023. № 46 (493). С. 44–47. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://moluch.ru/archive/493/107716 (дата обращения: 23.02.2025).
10. Филь О.А., Шаповалов С.И., Касимов А.О. Организация строительства в стесненных условиях жилого дома // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1 (52). С. 150. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5590 (дата обращения: 23.02.2025).
11. Чередниченко Т.Ф., Тухарели В.Д., Снегирев Д.П. Направленность современного строительства — застройка городов в стесненных условиях // Инженерный вестник Дона. 2018. № 1 (48). С. 145. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4743 (дата обращения: 23.02.2025).
12. Акопян Г.Т., Кирюникова Н.М., Лесовая Э.Д. и др. Опыт использования ПО Cyclone для моделирования и определения смещения объекта в пространстве // Научные труды КубГТУ. 2020. № 8. С. 932–941. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0081/4130.pdf (дата обращения: 23.02.2025).
13. Zhou Y., Zhu J., Zhao L., et al. High-Precision Monitoring Method for Bridge Deformation Measurement and Error Analysis Based on Terrestrial Laser Scanning // Remote Sensing. 2024. Vol. 16. Iss. 13. P. 2263. DOI:10.3390/rs16132263.
14. Xu H., Li H., Yang X., et al. Integration of Terrestrial Laser Scanning and NURBS Modeling for the Deformation Monitoring of an Earth-Rock Dam // Sensors. 2019. Vol. 19. Iss. 1. P. 22. DOI:10.3390/s19010022.
15. Шоломицкий А.А., Ханнанов Р.Р., Олейникова Е.А. Особенности обработки и анализа результатов наземного лазерного сканирования при геодезическом мониторинге земляных дамб // Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 2. С. 31–40. DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-2-31-40.

16. Seo H. Tilt Mapping for Zigzag-Shaped Concrete Panel in Retaining Structure Using Terrestrial Laser Scanning // Journal of Civil Structural Health Monitoring. 2021. Vol. 11. P. 851–865. DOI:10.1007/s13349-021-00484-x.
17. Носков И.В., Черепанов Д.Н. Применение технологии 3D сканирования для определения деформации оснований и фундаментов резервуаров при разработке месторождений нефти // Вестник Евразийской науки. 2023. Т. 15, № 5. С. 1–10. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://esj.today/PDF/05NZVN523.pdf (дата обращения: 23.02.2025).
18. Nuttens T., De Wulf A., Deruyter G., et al. Deformation Monitoring with Terrestrial Laser Scanning: Measurement and Processing Optimization Through Experience // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2012. Vol. 2. P. 707–714. DOI:10.5593/sgem2012/s07.v2006.
19. Горохова Е.И. Геомониторинг инженерных сооружений и прогнозирование их деформаций по данным лазерного сканирования // Вестник СГУГиТ. 2016. № 2 (34). С. 65–72.
20. Середович В.А., Иванов А.В. Исследования точности измерений, выполненных наземным лазерным сканером // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. IX Международный научный конгресс: сборник материалов в 3 т. Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1, № 3. С. 134–143.
21. Афонин Д.А., Богомолова Н.Н., Брынь М.Я. и др. Опыт применения наземного лазерного сканирования при обследовании инженерных сооружений // Геодезия и картография. 2020. Т. 81, № 4. С. 2–8. DOI:10.22389/0016-7126-2020-958-4-2-8.
22. Носков И.В., Черепанов Д.Н. Комплексный геомониторинг оснований и фундаментов резервуаров вертикальных стальных (РВС) на основе лазерного сканирования при разработке нефтяных месторождений // Вестник Евразийской науки. 2022. Т. 14, № 4. С. 1–13. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://esj.today/PDF/03NZVN422.pdf (дата обращения: 03.03.2025).
23. Богданов А.Н., Алешутин И.А. Наземное лазерное сканирование в строительстве и BIM-технологиях // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 4 (46). С. 326–332.
24. Носков И.В., Черепанов Д.Н., Прохоров А.В. Анализ методов и средств измерений для мониторинга деформации оснований и фундаментов резервуаров при обустройстве месторождений углеводородного сырья // Ползуновский альманах. 2024. № 1. С. 146–148.
25. Жидяев С.С., Молоков П.В. Комплексное исследование точности и надежности различных методов наземного лазерного сканирования и обработки полученных данных // Вестник МИИГАиК. Сборник научных статей 79-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в рамках Международной студенческой недели науки СНН-2024 (8–12 апреля 2024 г.). М.: МИИГАиК, 2024. С. 115–127.
26. Куштин В.И., Ревякин А.А., Соколова В.А. и др. Современные методы мониторинга деформаций зданий и сооружений // Инженерный вестник Дона. 2020. № 11 (71). С. 27–37. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2020/6665 (дата обращения: 02.02.2025).
27. Олейник А.М., Привалов А.В. О возможности применения наземного лазерного сканирования для деформационного мониторинга сооружений нефтегазовых месторождений // Инновации и инвестиции. 2021. № 4. С. 185–188.
28. Rashidi M., Mohammadi M., Sadeghlou Kivi S., et al. A Decade of Modern Bridge Monitoring Using Terrestrial Laser Scanning: Review and Future Directions // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. Iss. 22. P. 3796. DOI:10.3390/rs12223796.
29. Жидяев С.С. Применение наземного лазерного сканирования для высокоточного геодезического мониторинга // Российский форум изыскателей: сборник докладов V Международной научно-практической конференции (18–22 сентября 2023 г.). М.: КДУ; Добросвет, 2023. С. 62–66.
30. Gao R., Park J., Hu X., et al. Reflective Noise Filtering of Large-Scale Point Cloud Using Multi-Position LiDAR Sensing Data // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. Iss. 16. P. 3058. DOI:10.3390/rs13163058.

31. Shen N., Wang B., Ma H., et al. A Review of Terrestrial Laser Scanning (TLS)-Based Technologies for Deformation Monitoring in Engineering // Measurement. 2023. Vol. 223. P. 113684. DOI:10.1016/j.measurement.2023.113684.
32. Ruggles S., Clark J., Franke K.W., et al. Comparison of SfM Computer Vision Point Clouds of a Landslide Derived from Multiple Small UAV Platforms and Sensors to a TLS-Based Model // Journal of Unmanned Vehicle Systems. 2016. Vol. 4. Iss. 4. P. 246–265. DOI:10.1139/juvs-2015-0043.
33. Diaz V., van Oosterom P., Meijers M., et al. Comparison of Cloud-to-Cloud Distance Calculation Methods: Is the Most Complex Always the Most Suitable? // Recent Advances in 3D Geoinformation Science. Cham: Springer, 2024. P. 329–334. DOI:10.1007/978-3-031-43699-4_20.
34. Mukupa W., Roberts G.W., Hancock C.M., et al. A Review of the Use of Terrestrial Laser Scanning Application for Change Detection and Deformation Monitoring of Structures // Survey Review. 2016. Vol. 49. Iss. 353. P. 99–116. DOI:10.1080/00396265.2015.1133039.
35. Wujanz D. Terrestrial Laser Scanning for Geodetic Deformation Monitoring: Doctoral Thesis. Berlin, 2016. 169 p. DOI:10.14279/depositonce-5136.

автор **Жидяев Семен Сергеевич**
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра высшей математики, геодезический факультет
0009-0004-1389-6755

**Поступила 24.04.2025. Принята к публикации 20.02.2026. Опубликована 27.02.2026.**

UDC 528.4
DOI:10.30533/GiA-2026-002

CC BY

# Experimental Study of the Capabilities of Terrestrial Laser Scanning for High-Precision Monitoring of Planar Displacements of Engineering Structures

**Semen S. Zhidyaev**[1] ✉

[1] Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
✉ zhidyaev09@gmail.com

**citation** Zhidyaev SS. Experimental Study of the Capabilities of Terrestrial Laser Scanning for High-Precision Monitoring of Planar Displacements of Engineering Structures. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2026;70(1): 29–51. DOI:10.30533/GiA-2026-002.

**keywords** terrestrial laser scanning, planar displacements, deformation monitoring, point cloud, data processing algorithms, measurement accuracy, building monitoring, geodetic control

**abstract** Modern geodetic monitoring methods require high accuracy and efficiency in detecting deformations of engineering structures. This article examines the application of terrestrial laser scanning (TLS) for determining the planar displacements of objects, with a primary focus on an experimental study of the method's accuracy. The research is based on experimental data obtained from deformation modeling and the analysis of sequential observation cycles using point clouds. The aim of the study is to assess the capabilities of the TLS method in detecting small displacements and to determine its accuracy characteristics. The paper presents the methodology for processing point clouds and the algorithms for data analysis. Experiments have been conducted to demonstrate the method's ability to detect displacements with high precision. The study identifies the limitations of TLS caused by the technical specifics of the equipment and proposes possible ways to minimize them. The results confirm the potential of TLS for high-precision structural monitoring, particularly in densely built environments where traditional methods may be less effective. The practical significance of this study lies in the possibility of integrating the proposed method into deformation monitoring systems for engineering structures such as buildings, bridges, and industrial constructions, thereby improving the reliability of geodetic measurements and enabling rapid response to critical structural changes.

**references**

1. Kiryunikova NM, Lesovaya NM, Gura DA. Geodezicheskiy monitoring kak sredstvo nablyudeniya za sostoyaniem ob"yektov infrastruktury [Geodetic Monitoring as a Means of Observing the Condition of Infrastructure Objects]. *Modern Problems and Prospects*

*of Development of Land and Property Relations: Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference.* Krasnodar: KSAU; 2020: 390–395. (In Russian).
2. Khannanov RR, Mikhnev AV. Geodezicheskiy monitoring sostoyaniya ograzhdayushchey damby No. 1 zolootvala TOO "GRES Topar" po metodike nazemnogo lazernogo skanirovaniya [Geodetic Monitoring of the Condition of Retaining Dam No. 1 of Ash Dump at GRES Topar Using Terrestrial Laser Scanning]. *Interexpo GEO-Sibir. Proceedings of the XVIII International Scientific Congress.* In 8 vols. Vol. 1. Novosibirsk: SSUGT; 2022: 13–18. (In Russian). DOI:10.33764/2618-981X-2022-1-13-18.
3. Galiev IKh, Ibragimov RA, Ashrapov AKh. Vozmozhnosti 3D skanerov pri monitoringe rekonstruirovannykh zdaniy [Capabilities of 3D Scanners for Monitoring Reconstructed Buildings]. *BIM in Construction & Architecture: Proceedings of the IV International Conference (April 21–23, 2021).* St. Petersburg: SPSUACE; 2021: 274–281. (In Russian). DOI:10.23968/BIMAC.2021.035.
4. Wu C, Yuan Y, Tang Y, et al. Application of Terrestrial Laser Scanning (TLS) in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry. *Sensors.* 2022;22(1): 265. DOI:10.3390/s22010265.
5. Khannanov RR. Lazernoe skanirovanie dlya opredeleniya deformatsiy nasypnykh damb [Laser Scanning for Determining Deformations of Embankment Dams]. *Interexpo GEO-Sibir. Proceedings of the XIX International Scientific Congress.* In 8 vols. Vol. 1. Part 1. Novosibirsk: SSUGT; 2023: 149–153. (In Russian). DOI:10.33764/2618-981X-2023-1-1-149-153.
6. Sholomitskiy AA, Lagutina EK, Soboleva EL. Primenenie lazernogo skanirovaniya dlya monitoringa bol'sheproletnykh sooruzheniy [Application of Laser Scanning for Monitoring Large-Span Structures]. *Vestnik SSUGT.* 2018;23(2): 43–57. (In Russian).
7. Mursalimova EA, Bazhirova GK, Seitkazy AK. Geodezicheskiy kontrol' protsessa deformatsii vysokikh sooruzheniy s ispol'zovaniem tekhnologii nazemnogo lazernogo skanirovaniya [Geodetic Control of High-Rise Structures Deformation Using Terrestrial Laser Scanning]. *The Scientific Heritage.* 2022;101: 28–34. (In Russian). DOI:10.5281/zenodo.7340757.
8. Vasileva MD. Problema stroitel'stva v stesnennykh usloviyakh gorodskoy sredy (zastroyki) [The Problem of Construction in Constrained Urban Environments]. *Innovative Methods of Organizing Construction Production: Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference (November 17–18, 2022).* St. Petersburg: SPSUACE; 2023: 78–84. (In Russian).
9. Mamchenkov VD. Osobennosti stroitel'stva v usloviyakh plotnoy gorodskoy zastroyki [Features of Construction in Dense Urban Environments]. *Molodoy uchenyy.* 2023;46 (493): 44–47. (In Russian). Available from: https://moluch.ru/archive/493/107716 (Accessed 23 February 2025).
10. Fil' OA, Shapovalov SI, Kasimov AO. Organizatsiya stroitel'stva v stesnennykh usloviyakh zhilyogo doma [Organization of Construction in Constrained Conditions of a Residential Building]. *Engineering Bulletin of Don.* 2019;1(52): 150. (In Russian). Available from: https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5590 (Accessed 23 February 2025).
11. Cherednichenko TF, Tukhareli VD, Snegirev DP. Napravlennost' sovremennogo stroitel'stva – zastroyka gorodov v stesnennykh usloviyakh [Modern Construction Trends – Building in Constrained Urban Areas]. *Engineering Bulletin of Don.* 2018;1(48): 145. (In Russian). Available from: https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4743 (Accessed 23 February 2025).
12. Akopyan GT, Kiryunikova NM, Lesovaya ED, et al. Opyt ispol'zovaniya Cyclone dlya modelirovaniya i opredeleniya smeshcheniya ob"yekta v prostranstve [Experience in Using Cyclone for Modeling and Determining Object Displacement in Space]. *Scientific Papers of Kuban State Technological University.* 2020;8: 932–941. (In Russian). Available from: https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0081/4130.pdf (Accessed 23 February 2025).
13. Zhou Y, Zhu J, Zhao L, et al. High-Precision Monitoring Method for Bridge Deformation Measurement and Error Analysis Based on Terrestrial Laser Scanning. *Remote Sensing.* 2024;16(13): 2263. DOI:10.3390/rs16132263.

14. Xu H, Li H, Yang X, et al. Integration of Terrestrial Laser Scanning and NURBS Modeling for the Deformation Monitoring of an Earth-Rock Dam. ***Sensors.*** 2019;19(1): 22. DOI:10.3390/s19010022.
15. Sholomitskiy AA, Khannanov RR, Oleynikova EA. Osobennosti obrabotki i analiza rezul'tatov nazemnogo lazernogo skanirovaniya pri geodezicheskom monitoringe zemlyanykh damb [Features of Processing and Analyzing TLS Results for Geodetic Monitoring of Earth Dams]. ***Vestnik SSUGT.*** 2024;29(2): 31–40. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-2-31-40.
16. Seo H. Tilt Mapping for Zigzag-Shaped Concrete Panel in Retaining Structure Using Terrestrial Laser Scanning. ***Journal of Civil Structural Health Monitoring.*** 2021;11: 851–865. DOI:10.1007/s13349-021-00484-x.
17. Noskov IV, Cherepanov DN. Primenenie tekhnologii 3D skanirovaniya dlya opredeleniya deformatsii osnovaniy i fundamentov rezervuarov pri razrabotke mestorozhdeniy nefti [Application of 3D Scanning for Determining Deformations of Foundations During Oil Field Development]. ***The Eurasian Scientific Journal.*** 2023;15(5): 1–10. (In Russian).
18. Nuttens T, De Wulf A, Deruyter G, et al. Deformation Monitoring with Terrestrial Laser Scanning: Measurement and Processing Optimization Through Experience. ***International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM.*** 2012;2: 707–714. DOI:10.5593/sgem2012/s07.v2006.
19. Gorokhova EI. Geomonitoring inzhenernykh sooruzheniy i prognozirovanie ikh deformatsiy po dannym lazernogo skanirovaniya [Geomonitoring of Engineering Structures and Deformation Prediction Using Laser Scanning Data]. ***Vestnik SSUGT.*** 2016;2(34): 65–72. (In Russian).
20. Seredovich VA, Ivanov AV. Issledovaniya tochnosti izmereniy, vypolnennykh nazemnym lazernym skanerom [Accuracy Analysis of Terrestrial Laser Scanner Measurements]. ***Interexpo GEO-Sibir. Proceedings of the IX International Scientific Congress.*** In 3 vols. Vol. 1. Novosibirsk: SSGA; 2013: 134–143. (In Russian).
21. Afonin DA, Bogomolova NN, Bryn MYa, et al. Opyt primeneniya nazemnogo lazernogo skanirovaniya pri obsledovanii inzhenernykh sooruzhenii [Experience in the Use of Ground-Based Laser Scanning at Inspecting Engineering Structures]. ***Geodesy and Cartography***. 2020;81(4): 2–8. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2020-958-4-2-8.
22. Noskov IV, Cherepanov DN. Kompleksnyy geomonitoring osnovaniy i fundamentov rezervuarov vertikal'nykh stal'nykh (RVS) na osnove lazernogo skanirovaniya [Integrated Geomonitoring of Vertical Steel Tank Foundations Using TLS]. ***The Eurasian Scientific Journal***. 2022;14(4): 1–13. (In Russian). Available from: https://esj.today/PDF/03NZVN422.pdf (Accessed 3 March 2025).
23. Bogdanov AN, Aleshutin IA. Nazemnoe lazernoe skanirovanie v stroitel'stve i BIM-tekhnologiyakh [Terrestrial Laser Scanning in Construction and BIM Technologies]. ***News of the Kazan State University of Architecture and Engineering.*** 2018;4(46): 326–332. (In Russian).
24. Noskov IV, Cherepanov DN, Prokhorov AV. Analiz metodov i sredstv izmereniy dlya monitoringa deformatsii osnovaniy i fundamentov rezervuarov pri obustroystve mestorozhdeniy uglevodorodnogo syr'ya [Analysis of Measurement Methods for Monitoring Deformations of Hydrocarbon Field Foundations]. ***Polzunovsky Almanac.*** 2024;1: 146–148. (In Russian).
25. Zhidayev SS, Molokov PV. Kompleksnoe issledovanie tochnosti i nadezhnosti razlichnykh metodov TLS i obrabotki dannykh [Comprehensive Study of Accuracy and Reliability of Various TLS Methods and Data Processing]. ***Vestnik MIIGAiK. Proceedings of the 79th Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists within the Framework of the International Student Science Week SNN-2024 (April 8–12, 2024).*** Moscow: MIIGAiK; 2024: 115–127. (In Russian).
26. Kushtin VI, Revyakin AA, Sokolova VA, et al. Sovremennye metody monitoringa deformatsiy zdaniy i sooruzheniy [Modern Methods of Monitoring Deformations of Buildings and Structures]. ***Engineering Bulletin of Don.*** 2020;11(71): 27–37. (In Russian). Available from: https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2020/6665 (Accessed 2 February 2025).
27. Oleynik AM, Privalov AV. O vozmozhnosti primeneniya nazemnogo lazernogo skanirovaniya dlya deformatsionnogo monitoringa sooruzheniy neftegazovykh

mestorozhdeniy [On the Feasibility of Using TLS for Deformation Monitoring of Oil and Gas Field Structures]. ***Innovation & Investment.*** 2021;4: 185–188. (In Russian).
28. Rashidi M, Mohammadi M, Sadeghlou Kivi S, et al. A Decade of Modern Bridge Monitoring Using Terrestrial Laser Scanning: Review and Future Directions. ***Remote Sensing.*** 2020;12(22): 3796. DOI:10.3390/rs12223796.
29. Zhidayev SS. Primenenie nazemnogo lazernogo skanirovaniya dlya vysokotochnogo geodezicheskogo monitoringa [Application of TLS for High-Precision Geodetic Monitoring]. ***Russian Prospectors Forum: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference (September 18–22, 2023).*** Moscow: KDU; Dobrosvet; 2023: 62–66. (In Russian).
30. Gao R, Park J, Hu X, et al. Reflective Noise Filtering of Large-Scale Point Cloud Using Multi-Position LiDAR Sensing Data. ***Remote Sensing.*** 2021;13(16): 3058. DOI:10.3390/rs13163058.
31. Shen N, Wang B, Ma H, et al. A Review of Terrestrial Laser Scanning (TLS)-Based Technologies for Deformation Monitoring in Engineering. ***Measurement.*** 2023;223: 113684. DOI:10.1016/j.measurement.2023.113684.
32. Ruggles S, Clark J, Franke KW, et al. Comparison of SfM Computer Vision Point Clouds of a Landslide Derived from Multiple Small UAV Platforms and Sensors to a TLS-Based Model. ***Journal of Unmanned Vehicle Systems.*** 2016;4(4): 246–265. DOI:10.1139/juvs-2015-0043.
33. Diaz V, van Oosterom P, Meijers M, et al. Comparison of Cloud-to-Cloud Distance Calculation Methods: Is the Most Complex Always the Most Suitable? ***Recent Advances in 3D Geoinformation Science.*** Cham: Springer; 2024: 329–334. DOI:10.1007/978-3-031-43699-4_20.
34. Mukupa W, Roberts GW, Hancock CM, et al. A Review of the Use of Terrestrial Laser Scanning Application for Change Detection and Deformation Monitoring of Structures. ***Survey Review.*** 2016;49(353): 99–116. DOI:10.1080/00396265.2015.1133039.
35. Wujanz D. ***Terrestrial Laser Scanning for Geodetic Deformation Monitoring.*** Doctoral Thesis. Berlin; 2016. 169 p. DOI:10.14279/depositonce-5136.

author **Semen S. Zhidyaev**
Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Higher Mathematics, Faculty of Geodesy
0009-0004-1389-6755

**Submitted: April 24, 2025. Accepted: February 20, 2026. Published: February 27, 2026.**

УДК 528.48:627
DOI:10.30533/GiA-2026-003

CC BY

# Комплексная оценка дифференциальных деформаций противоположных сторон плотины Рвегура методами геодезического и пьезометрического мониторинга

**Бьенвеню Биханга**[1]

[1] Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия
bihangab@gmail.com

**цитирование** Биханга Бьенвеню. Комплексная оценка дифференциальных деформаций противоположных сторон плотины Рвегура методами геодезического и пьезометрического мониторинга // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 1. С. 52–63. DOI:10.30533/GiA-2026-003.

**ключевые слова** геодезический мониторинг, пьезометрический мониторинг, плотина Рвегура, асимметричное смещение, корреляционный анализ, деформационное состояние плотины, гидротехническое сооружение

**аннотация** В данной работе представлены результаты исследования дифференциальных деформаций противоположных сторон плотины Рвегура (Республика Бурунди) на основе интеграции данных геодезического и пьезометрического мониторинга за 1992–2018 годы. Целью исследования является разработка методики оценки асимметричных деформационных процессов для обеспечения безопасной эксплуатации гидротехнического сооружения. Методология исследования основана на анализе данных четырех профилей (P100, P140, P180, P200), расположенных на правобережной, центральной и левобережной частях плотины. Применены методы корреляционного анализа для выявления связей между пьезометрическими показаниями и горизонтальными смещениями конструкции. Установлена выраженная асимметрия в деформационном поведении противоположных сторон плотины: правобережная часть (P100) характеризуется максимальными смещениями до 30 мм со скоростью 1,5 мм/год, в то время как левобережная часть (P200) демонстрирует минимальные деформации около 9 мм. Выявлена корреляционная зависимость между пьезометрическим давлением и деформациями: отрицательная корреляция для верховых смещений (до −0,88) и положительная — для низовых (до 0,90). Результаты исследования показали эффективность интегрированного подхода, когда непрерывные пьезометрические измерения обеспечивают интерполяцию между дискретными геодезическими данными, создавая целостную

картину деформационных процессов. Пьезометрическими данными демонстрируются опережающие индикаторы деформационных изменений, которые впоследствии подтверждаются геодезическими измерениями. Практическая значимость работы заключается в обосновании дифференцированного подхода к мониторингу различных участков плотины с приоритетным вниманием к правобережной части как зоне повышенного риска. Разработанная методика может быть применена для оптимизации систем контроля безопасности других гидротехнических сооружений.

# 1 Введение

Обеспечение безопасности и долговечности гидротехнических сооружений является важной научно-технической задачей современности. Плотины представляют собой стратегически значимые объекты инфраструктуры, выполняющие ключевые функции в системах водоснабжения, выработке электроэнергии и управлении водными ресурсами. Однако данные сооружения, будучи необходимыми для социально-экономического развития, одновременно являются источниками потенциального риска, обусловленного деформационными процессами, которым они подвергаются с течением времени[1].

Современные исследования показывают, что деформационное поведение различных участков плотин может существенно различаться в зависимости от геологических условий основания, конструктивных особенностей и режима эксплуатации. Асимметричные деформации представляют особую опасность, поскольку могут привести к неравномерному распределению напряжений в теле сооружения и развитию критических состояний [1–3].

В практике исследования деформационных процессов гидротехнических сооружений применяется широкий спектр геодезических методов, среди которых особое место занимают различные виды нивелирования. Основным методом геодезического мониторинга осадок традиционно считается геометрическое нивелирование [4–6].

Пьезометры представляют собой устройства, предназначенные для измерения давления жидкостей в грунтах или конструкциях. Основная функция данных приборов заключается в определении уровня подземных вод и давления в водонасыщенных грунтах, что имеет важное значение для мониторинга состояния гидротехнических сооружений [7–9].

Современные технологии мониторинга малых деформаций плотин включают использование цифровых пьезометров, которые обеспечивают высокую точность измерений и возможность удаленного сбора данных. Эти устройства фиксируют изменения уровня воды с точностью до 0,01 мм [10, 11].

Пьезометрический мониторинг обеспечивает непрерывное отслеживание внутренних процессов в теле плотины, включая изменения порового давления и фильтрационных напоров, в отличие от дискретных геодезических измерений, проводимых еженедельно или ежемесячно. Геодезические измерения предоставляют высокоточные данные об абсолютных смещениях конструктивных элементов и служат эталонной основой для калибровки пьезометрических данных [12–14].

Интеграция названных методик создает многоуровневую систему мониторинга: непрерывные пьезометрические измерения обеспечивают нелинейную интерполяцию между дискретными геодезическими точками, создавая непрерывную картину деформационных процессов. Пьезометрические данные дают представление об опережающих индикаторах деформационных изменений, которые впоследствии подтверждаются геодезическими измерениями.

1 СП 40.13330.2012. Плотины бетонные и железобетонные. Актуализированная редакция СНиП 2.06.06-85. М.: ФЦС, 2012. 65 с.

Для Республики Бурунди эффективное управление водными ресурсами имеет стратегическое значение, определяющее траекторию экономического и социального развития. Плотина Рвегура, введенная в эксплуатацию в 1986 году, играет ключевую роль в обеспечении энергетических потребностей и водоснабжении. Данное сооружение является не только критически важным элементом существующей инфраструктуры, но и основным компонентом в реализации национальных стратегических программ развития [15].

Цель исследования заключается в разработке комплексной методики оценки дифференциальных деформаций противоположных сторон плотины Рвегура на основе интеграции данных геодезического и пьезометрического мониторинга для обеспечения безопасной эксплуатации гидротехнического сооружения и прогнозирования критических деформационных состояний.

## 2 Материалы и методы

Объект исследования — плотина Рвегура — расположена в горной части Республики Бурунди. Это гидротехническое сооружение конструктивно относится к типу земляных плотин. У нее следующие технические параметры: длина — 220 м, высота — 47 м, ширина — 6 м, расход воды — 8 м$^3$/с, общая площадь водной поверхности — 2,6 км$^2$.

Плотина находится на территории, подверженной сильному сезонному влиянию изменения уровня воды. В данном контексте крайне важно применение современных методов мониторинга деформационных процессов на плотине для обеспечения ее надежности, безопасности и бесперебойного функционирования [15].

На плотине Рвегура установлены четыре профиля: P100, P140, P180 и P200 (рис. 1). Каждый из них содержит несколько пунктов для выполнения разнородных измерений. Профиль P100 расположен на правом берегу плотины, профиль P140 — в центральной части, а профили P180 и P200 — на левом берегу.

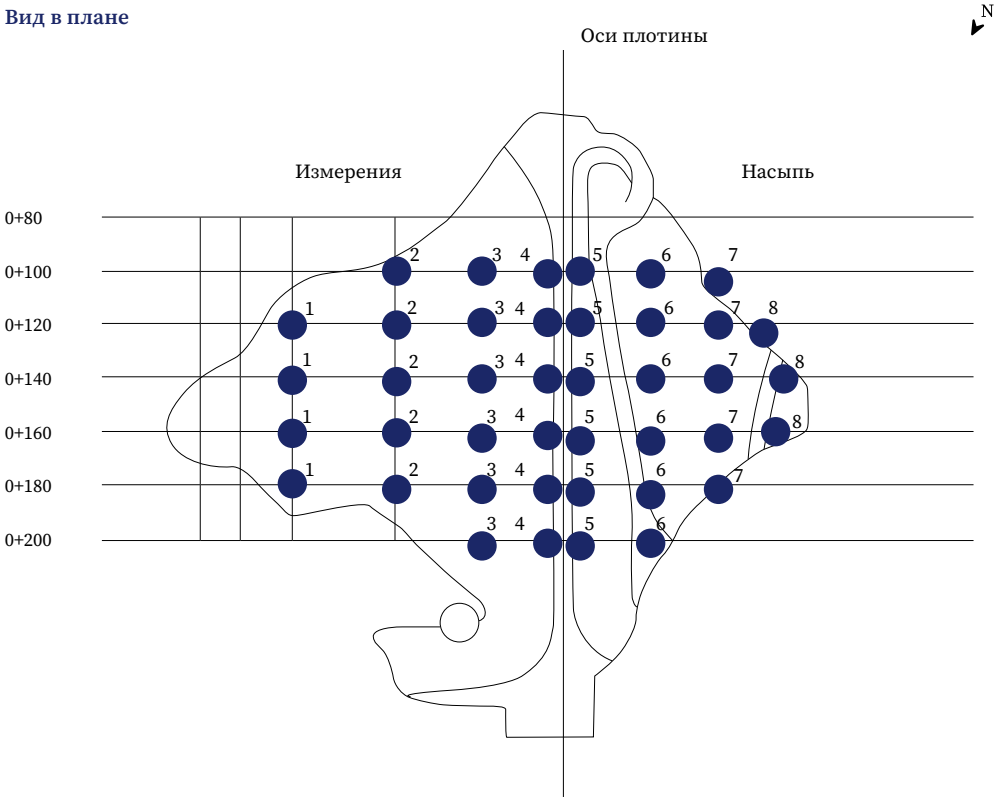



**Рис. 1**
Расположение профилей плотины P100, P140, P180 и P200

**Fig. 1**
Location of the dam profiles P100, P140, P180 and P200

Для анализа деформации использованы данные геодезического мониторинга плотины Рвегура за 1992–2015 годы и пьезометрические измерения за 1992–2018 годы. Проведен корреляционный анализ данных геодезического и пьезометрического мониторинга для выявления закономерности деформационных процессов.

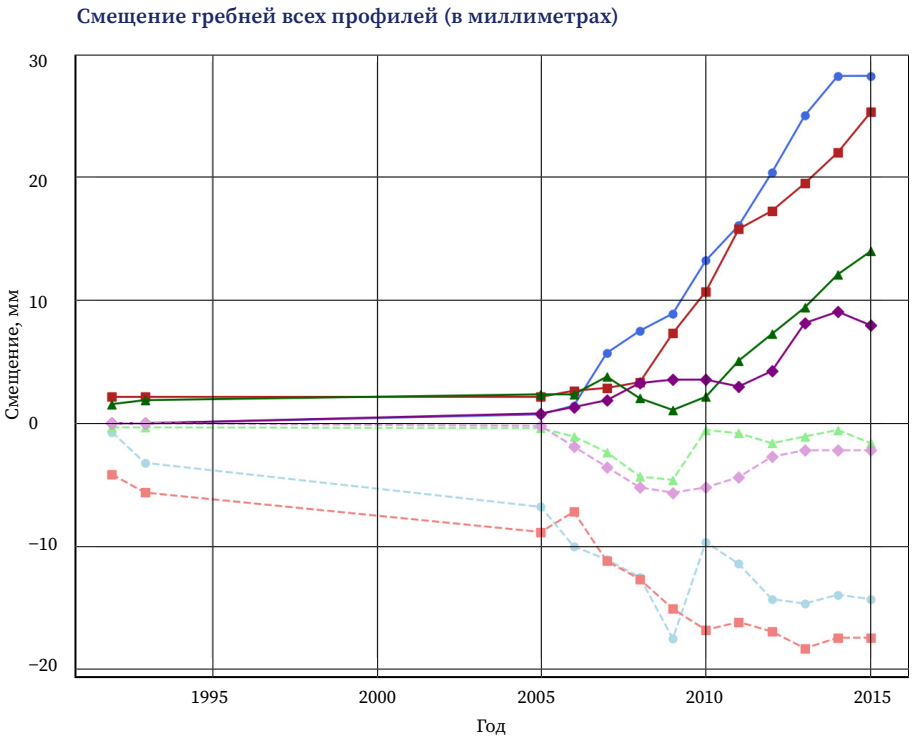
# 3 Результаты

## 3.1 Анализ геодезических данных

Анализ данных геодезического мониторинга плотины Рвегура за 1992–2015 годы позволил выявить закономерности деформационных процессов и их пространственно-временную эволюцию. Результаты долгосрочных наблюдений демонстрируют выраженную асимметрию в деформационном поведении различных участков плотины (рис. 2).

**Рис. 2**
Анализ смещения на основе данных геодезического мониторинга по всем профилям

**Fig. 2**
Displacement analysis based on geodetic monitoring data for all profiles



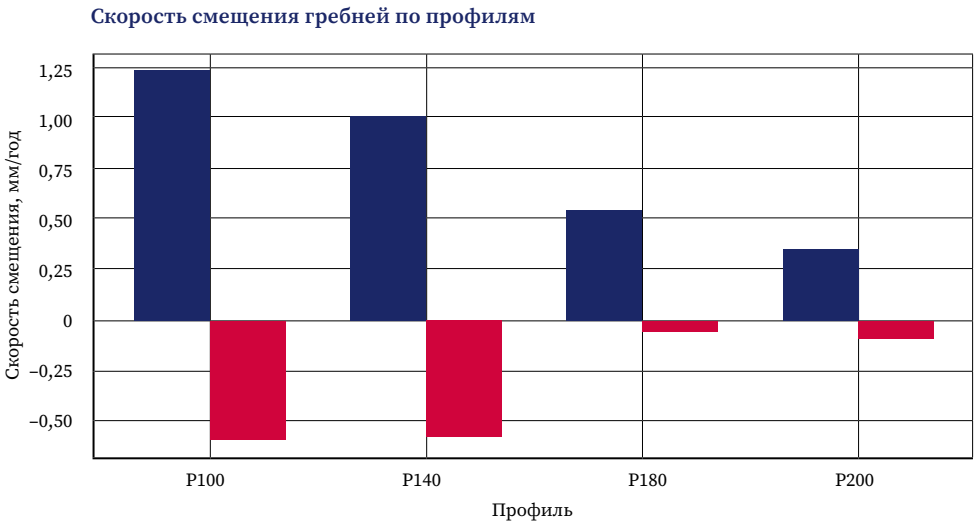

Левобережная часть плотины (профили P180 и P200) характеризуется минимальными деформациями среди всех исследуемых участков. Для профиля P200 максимальное смещение гребня в верховую сторону составляет лишь около 9 мм к 2015 году.

Наиболее интенсивные деформационные процессы наблюдаются в правобережной части плотины (профиль P100): смещения гребня в верховую сторону достигли к 2015 году величины около 30 мм со скоростью 1,5 мм/год. Центральная часть плотины (профиль P140) демонстрирует промежуточные значения смещений по сравнению с береговыми профилями. Максимальное смещение гребня в верховую сторону составляет здесь около 15–18 мм к 2015 году.

Скорость развития деформаций также демонстрирует определенную временную динамику. Для правобережного профиля P100 наблюдается небольшое ускорение смещений в период с 2005 по 2010 год, когда скорость верховых смещений достигала 1,8–2,0 мм/год. В последующие годы (2010–2015) скорость

**Рис. 3**
Скорость смещения по профилям

**Fig. 3**
Displacement velocity along profiles




несколько снизилась до 1,3–1,5 мм/год, что может свидетельствовать о начале стабилизации деформационных процессов (рис. 3).

Для левобережных профилей P180 и P200 скорость смещений остается практически постоянной на протяжении всего времени их проявления, без выраженных периодов ускорения или замедления. Это указывает на более стабильное деформационное поведение левобережной части плотины по сравнению с правобережной.

## 3.2 Анализ пьезометрических данных

Пьезометрические измерения позволяют определить распределение гидростатического давления в различных точках тела плотины, что является критически важным для оценки устойчивости конструкции к сдвиговым деформациям.

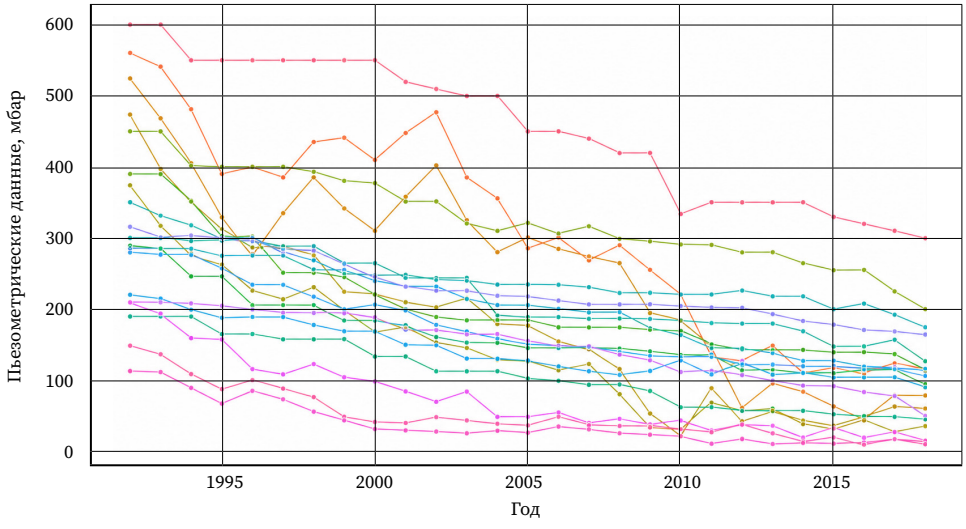
Анализ пьезометрических данных, собранных в период с 1992 по 2018 год, позволил детально проследить изменение состояния плотины Рвегура на протяжении более чем двух десятилетий эксплуатации (рис. 4).

Профиль P100, расположенный на правом берегу плотины, демонстрирует наиболее выраженную динамику изменения пьезометрических показаний. Начальный период наблюдений характеризовался высокими значениями порового давления в диапазоне 380–600 мбар.

Профиль P140 в центральной части плотины демонстрирует более сложную картину с начальными значениями в диапазоне 200–350 мбар и существенной

**Рис. 4**
Изменение пьезометрических данных в профилях P100, P140, P180 и P200

**Fig. 4**
Change in piezometric data in profiles P100, P140, P180 and P200



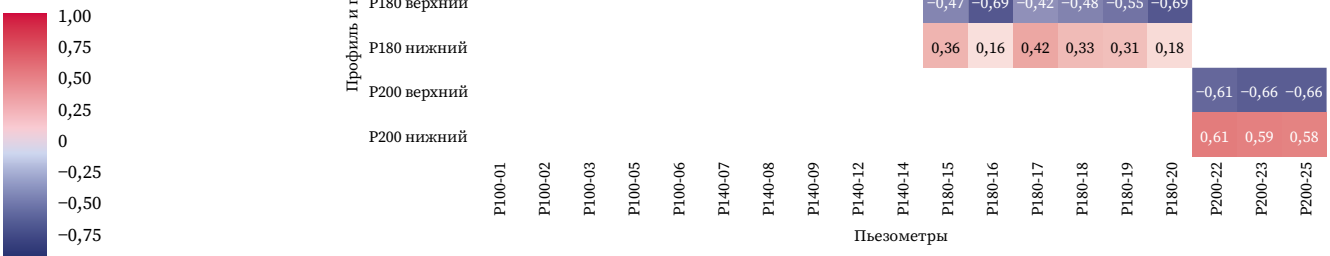
дифференциацией в показаниях различных пьезометров. Профили Р180 и Р200 на левом берегу характеризуются наименьшими значениями пьезометрического давления: для Р180 — 150–300 мбар, для Р200 — 100–220 мбар, что свидетельствует о лучших противофильтрационных свойствах левобережного примыкания.

## 3.3 Корреляционный анализ дифференциальных деформаций

Анализ корреляций между смещениями гребня и пьезометрическими уровнями демонстрирует выраженную закономерность: верховые смещения характеризуются отрицательной корреляцией с пьезометрическими уровнями, в то время как низовые смещения имеют положительную корреляцию (рис. 5).

**Рис. 5**
Тепловая карта корреляций между смещениями гребня плотины и пьезометрическими данными

**Fig. 5**
Heat map of correlations between dam crest displacements and piezometric data




Корреляционная зависимость оценивалась с использованием коэффициента корреляции Пирсона. Наиболее сильная корреляционная связь наблюдается для профиля Р100 с коэффициентами до –0,88 для верховых смещений и +0,90 — для низовых.

Профили Р180 и Р200 характеризуются менее выраженной корреляционной связью, причем для профиля Р180 значения коэффициентов корреляции Пирсона для низовых смещений существенно ниже (+0,16… +0,42), чем для других профилей. Такое распределение коэффициентов корреляции отражает механизм взаимодействия фильтрационных процессов и деформаций плотины: повышение пьезометрического давления приводит к усилению сдвиговых деформаций гребня в сторону нижнего бьефа и ослаблению деформаций в сторону верхнего бьефа.

## 3.4 Сравнительный анализ противоположных сторон

Комплексный анализ пьезометрических данных и результатов геодезического мониторинга позволяет сформировать целостное представление о фильтрационном режиме плотины Рвегура. Существенная асимметрия в распределении порового давления между правобережной и левобережной частями плотины корреспондирует с выявленной асимметрией в деформационном поведении. Снижение интенсивности корреляционной связи от правобережного к левобережному профилю согласуется с ранее выявленной асимметрией в деформационном и фильтрационном поведении плотины.

Полученные результаты имеют практическое значение для совершенствования методов прогнозирования деформаций плотины на основе пьезометрических данных и оптимизации системы мониторинга безопасности сооружения.

# 4 Обсуждение

Существенно большая интенсивность деформационных процессов в правобережной части плотины по сравнению с левобережной корреспондирует с выявленной ранее асимметрией в распределении пьезометрического давления. Это позволяет предположить наличие общей причины, обусловливающей оба явления. Наиболее вероятным объяснением является неоднородность геологических условий основания плотины, в частности различия в деформационных характеристиках грунтов правобережного и левобережного примыканий. Возможны также различия в конструктивных особенностях разных участков плотины, например в параметрах противофильтрационных устройств, дренажных систем или характеристиках материалов тела плотины [16].

Долгосрочные пьезометрические наблюдения представляют собой систематический сбор и анализ данных о поровом давлении в теле и основании плотины на протяжении длительного времени. Пьезометрические показатели имеют прямую корреляцию с деформационными процессами, происходящими в теле и основании плотины.

Изменение порового давления влияет на эффективные напряжения в грунте, что, в свою очередь, обуславливает его деформационные характеристики. Пьезометрический мониторинг позволяет отслеживать внутренние процессы в теле плотины (в том числе изменения порового давления и фильтрационных напоров) непрерывно, в отличие от геодезических измерений, которые проводятся еженедельно или ежемесячно [17].

Геодезические измерения точны, но дискретны и трудоемки, в то время как пьезометрия обеспечивает непрерывный автоматический мониторинг. Геодезические измерения позволяют с высокой точностью определить смещения конструктивных элементов и служат эталонной основой для калибровки пьезометрических данных. Интерполяция между геодезическими измерениями с использованием пьезометрических данных снижает ошибки и выявляет нелинейные деформации.

Совместное применение пьезометрического и геодезического мониторинга формирует комплексную систему контроля состояния гидротехнического сооружения. Непрерывные пьезометрические наблюдения позволяют отслеживать изменения фильтрационного режима в межцикловые периоды геодезических измерений, обеспечивая тем самым временну́ю преемственность в оценке деформационных процессов. При этом динамика порового давления выступает в роли предиктора горизонтальных смещений: характерные изменения пьезометрических уровней предшествуют регистрируемым геодезическими методами деформациям и служат их ранним индикатором. Интеграция двух методов мониторинга существенно повышает информативность наблюдений и снижает риск пропуска критических изменений в состоянии сооружения в периоды между плановыми геодезическими съемками, что особенно значимо с учетом высокой стоимости и трудоемкости геодезических работ на крупных гидротехнических объектах.

Данные результаты подтверждают эффективность интегрированного подхода к мониторингу деформационного состояния плотины и позволяют оптимизировать систему контроля безопасности гидротехнического сооружения. Обоснована необходимость дифференцированного подхода к мониторингу различных участков плотины с приоритетным вниманием к правобережной части как зоне повышенного риска, требующей более частого контроля и глубокого анализа результатов наблюдений.

# 5 Выводы

В результате исследования установлена выраженная асимметрия в фильтрационном режиме и деформационном поведении между правобережной и левобережной частями плотины Рвегура, проявляющаяся в значительно более высоких значениях пьезометрического давления и интенсивных горизонтальных смещениях правобережного профиля P100 по сравнению с левобережным P200.

Выявлена общая тенденция к снижению пьезометрического давления во всех профилях с 1992 по 2018 год. Это свидетельствует о постепенной стабилизации фильтрационного режима плотины и улучшении дренажных характеристик основания.

Сопоставление пьезометрических данных за 1992–2018 годы и результатов геодезического мониторинга за 1992–2015 годы позволило выявить устойчивую взаимообусловленность фильтрационных и деформационных процессов в теле плотины Рвегура. Пространственная неоднородность порового давления (с существенным превышением его значений в правобережной части над левобережной) находит прямое отражение в дифференцированном характере горизонтальных смещений по профилям.

Знаковая дифференциация коэффициентов корреляции между пьезометрическими уровнями и смещениями гребня подтверждает механизм гидростатического воздействия: рост порового давления усиливает смещения в низовую сторону и ослабляет — в верховую. При этом наиболее отчетливо данная закономерность выражена для правобережного профиля P100.

Полученные результаты свидетельствуют о практической состоятельности интегрированного подхода к мониторингу: совместная интерпретация пьезометрических и геодезических данных раскрывает механизмы, недоступные при использовании каждого метода в отдельности. Этим обосновывается целесообразность дифференцированной системы контроля за состоянием плотины — с повышенной интенсивностью наблюдений в правобережной зоне, являющейся участком с наибольшими фильтрационными нагрузками и деформационной активностью.

## библиография


1. Котов Ф.В., Саинов М.П. Параметры нелинейных моделей грунта для расчета напряженно-деформированного состояния каменно-набросной плотины // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14, № 3. С. 28–56. DOI:10.22227/2305-5502.2024.3.28-56.
2. Саинов М.П., Болдин А.А. Продолжительность консолидации грунта ядра каменно-земляной плотины // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15, № 3. С. 39–61. DOI:10.22227/2305-5502.2025.3.3.
3. Шоломицкий А.А., Ханнанов Р.Р., Тутанова М.С. Методика геодезического мониторинга за насыпными гидротехническими сооружениями // Вестник СГУГиТ. 2023. Т. 5, № 28. С. 25–32. DOI:10.33764/2411-1759-2023-28-5-25-32.
4. Устинов А.В. Разработка методики геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания (на примере здания Загорской ГАЭС-2): дис. … канд. техн. наук. Новосибирск, 2022. 156 с.
5. Палуанов Д.Т., Оспанова Д.К. Результаты натурных исследований осадок в теле земляной плотины // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 4. С. 385–395. DOI:10.31774/2712-9357-2023-13-4-385-395.
6. Григорьев Д.О., Ащеулов В.А. Анализ геодезических методов деформационного мониторинга гидротехнических сооружений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Международный научный конгресс: сборник материалов в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2020. Т. 6, № 1. С. 114–118. DOI:10.33764/2618-981X-2020-6-1-114-118.
7. Бандурин М.А. Диагностика технического состояния и оценка остаточного ресурса работоспособности водопроводящих сооружений оросительных систем: дис. … д-ра техн. наук. М., 2017. 349 с.
8. Рассказов Л.Н., Борисонов П.В., Чубатов И.В. Напряженно-деформированное состояние и деформации Рогунской плотины в строительный период // Гидротехническое строительство. 2018. № 2. С. 19–28.

9. Салямова К.Д., Руми Д.Ф. Динамика грунтового гидротехнического сооружения с учетом реологических свойств грунта // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 3. С. 31–35.
10. Болдина С.В., Копылова Г.Н. О возможности получения оценок упругих параметров водовмещающих пород по данным уровнемерных наблюдений в пьезометрических скважинах // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 2 (22). С. 184–195.
11. Калашник Н.А., Калашник А.И. Особенности фильтрационно-деформационного состояния насыпной грунтовой плотины ГЭС по данным компьютерного моделирования // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта. 2017. № 1 (4). С. 31–38.
12. Бакиев М.Р. Анализ проблем надежной и безопасной эксплуатации грунтовых плотин водохранилищных гидроузлов // Ирригация и мелиорация. 2018. № 3 (13). С. 14–17.
13. Мазуров Б.Т. Геодинамические системы (теоретические основы качественного исследования горизонтальных движений) // Вестник СГУГиТ. 2016. № 1 (33). С. 26–35.
14. Саинов М.П., Болдин А.А. Взаимосвязь напряженно-деформированного состояния и порового давления в каменно-земляной плотине // Научный журнал строительства и архитектуры. 2025. № 2 (78). С. 38–48. DOI:10.36622/2541-7592.2025.78.2.003.
15. Биханга Б. Оценка изменения уровня водохранилища плотины Рвегура по пьезометрическим данным // Успехи современного естествознания. 2025. № 2. С. 32–37. DOI:10.17513/use.38375.
16. Деменков П.А., Голдобина Л.А., Трушко О.В. Метод прогноза деформации земной поверхности при устройстве котлованов в условиях плотной городской застройки с применением способа «стена в грунте» // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 480–486. DOI:10.31897/PMI.2018.5.480.
17. Безродный К.П., Лебедев М.О. О нагрузках от горного давления на обделки тоннелей закрытого способа работ // Записки Горного института. 2017. Т. 228. С. 649–653. DOI:10.25515/PMI.2017.6.649.



**автор** **Биханга Бьенвеню**

ФГБОУ ВО «Государственный университет по землеустройству», Москва, Россия
кафедра геодезии и геоинформатики, факультет кадастра недвижимости и инфраструктуры пространственных данных
0009-0006-2709-7078


**Поступила 23.07.2025. Принята к публикации 20.02.2026. Опубликована 27.02.2026.**

UDC 528.3
DOI:10.30533/GiA-2026-003

CC BY

# Integrated Assessment of Differential Deformations of the Opposite Sides of Rwegura Dam by Geodetic and Piezometric Monitoring Methods

**Bienvenu Bihanga**[1]

[1] State University of Land Use Planning, Moscow, Russia
bihangab@gmail.com

**citation** Bienvenu Bihanga. Integrated Assessment of Differential Deformations of the Opposite Sides of Rwegura Dam by Geodetic and Piezometric Monitoring Methods. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2026;70(1): 52–63. DOI:10.30533/GiA-2026-003.

**keywords** geodetic monitoring, piezometric monitoring, Rwegura dam, asymmetric displacement, differential deformations, correlation analysis, dam deformation state, hydraulic structure

**abstract** The present work presents the results of a study of differential deformations of opposite sides of the Rwegura dam (Republic of Burundi) based on the integration of geodetic and piezometric monitoring data for the period 1992–2018. The aim of the study is to develop a methodology for assessing asymmetric deformation processes to ensure safe operation of hydraulic structures. The research methodology is based on the analysis of data from four profiles (P100, P140, P180, P200) located on the right bank, central and left bank parts of the dam. Correlation analysis methods were applied to identify relationships between piezometric readings and horizontal displacements of the structure. A pronounced asymmetry in the deformation behavior of opposite sides of the dam was established: the right bank part (P100) is characterized by maximum displacements up to 30 mm at a rate of 1.5 mm/year, while the left bank part (P200) demonstrates minimal deformations of about 9 mm. Correlation between piezometric pressure and deformations was revealed: negative correlation for upstream displacements (up to –0.88) and positive for downstream displacements (up to 0.90). The results demonstrated the effectiveness of an integrated approach where continuous piezometric measurements provide interpolation between discrete geodetic data, creating a comprehensive picture of deformation processes. Piezometric data demonstrate leading indicators of deformation changes that are subsequently confirmed by geodetic measurements. The practical significance lies in substantiating a differentiated approach to monitoring various sections of the dam with priority attention to the right bank part as a high-risk zone. The developed methodology can be applied to optimize safety control systems for other hydraulic.

## references


1. Kotov FV, Sainov MP. Parametry nelineinykh modelei grunta dlya rascheta napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kamenno-nabrosnoi plotiny [Parameters of Nonlinear Soil Models for Calculating the Stress-Strain State of a Rockfill Dam]. ***Construction: Science and Education.*** 2024;14(3): 28–56. (In Russian). DOI:10.22227/2305-5502.2024.3.28-56.
2. Sainov MP, Boldin AA. Prodolzhitel'nost' konsolidatsii grunta yadra kamenno-zemlyanoi plotiny [Consolidation Duration of the Core Soil in an Earth-Rock Fill Dam]. ***Construction: Science and Education.*** 2025;15(3): 39–61. (In Russian). DOI:10.22227/2305-5502.2025.3.3.
3. Sholomitsky AA, Khannanov RR, Tutanova MS. Metodika geodezicheskogo monitoringa za nasypnymi gidrotekhnicheskimi sooruzheniyami [Methodology of Geodetic Monitoring of Embankment Hydraulic Structures]. ***Vestnik SSUGT.*** 2023;5(28): 25–32. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2023-28-5-25-32.
4. Ustinov AV. ***Razrabotka metodiki geodezicheskogo monitoringa gidrotekhnicheskikh sooruzhenii v protsesse kompensatsionnogo nagnetaniya (na primere zdaniya Zagorskoi GAES-2)*** [Development of a Methodology for Geodetic Monitoring of Hydraulic Structures During Compensation Grouting (on the Example of the Zagorskaya GAES-2 Building)] [dissertation]. Novosibirsk; 2022. 156 p. (In Russian).
5. Paluanov DT, Ospanova DK. Rezul'taty naturnykh issledovanii osadok v tele zemlyanoi plotiny [Results of Field Studies of Settlements in the Body of an Earthfill Dam]. ***Land Reclamation and Hydraulic Engineering.*** 2023;13(4): 385–395. (In Russian). DOI:10.31774/2712-9357-2023-13-4-385-395.
6. Grigoriev DO, Ashcheulov VA. Analiz geodezicheskikh metodov deformatsionnogo monitoringa gidrotekhnicheskikh sooruzhenii [Analysis of Geodetic Methods of Deformation Monitoring of Hydraulic Structures]. ***Interexpo GEO-Sibir. Proceedings of the XVI International Scientific Congress.*** In 8 vols. Vol. 6. Part 1. Novosibirsk: SSUGT; 2020: 114–118. (In Russian). DOI:10.33764/2618-981X-2020-6-1-114-118.
7. Bandurin MA. ***Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya i otsenka ostatochnogo resursa rabotosposobnosti vodoprovodyashchikh sooruzhenii orositel'nykh sistem*** [Diagnostics of the Technical Condition and Assessment of the Residual Service Life of Water Conveyance Structures of Irrigation Systems] [dissertation]. Moscow; 2017. 349 p. (In Russian).
8. Rasskazov LN, Borisonov PV, Chubatov IV. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie i deformatsii Rogunskoi plotiny v stroitel'nyi period [Stress-Strain State and Deformations of the Rogun Dam During the Construction Period]. ***Hydraulic Engineering.*** 2018;2: 19–28. (In Russian).
9. Salyamova KD, Rumi DF. Dinamika gruntovogo gidrotekhnicheskogo sooruzheniya s uchetom reologicheskikh svoistv grunta [Dynamics of a Soil Hydraulic Structure Taking into Account the Rheological Properties of the Soil]. ***Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.*** 2015;3: 31–35. (In Russian).
10. Boldina SV, Kopylova GN. O vozmozhnosti polucheniya otsenok uprugikh parametrov vodovmeshchayushchikh porod po dannym urovnemernykh nablyudenii v p'ezometricheskikh skvazhinakh [On the Possibility of Obtaining Estimates of Elastic Parameters of Water-Bearing Rocks Based on Water Level Observations in Piezometric Wells]. ***Bulletin of KRAESC. Earth Sciences.*** 2013;2(22): 184–195. (In Russian).
11. Kalashnik NA, Kalashnik AI. Osobennosti fil'tratsionno-deformatsionnogo sostoyaniya nasypnoi gruntovoi plotiny GES po dannym komp'yuternogo modelirovaniya [Features of the Filtration-Deformation State of an Embankment Earth Dam of a Hydroelectric Power Station Based on Computer Simulation Data]. ***Modern Innovative Technologies for Training Engineering Personnel for the Mining Industry and Transport.*** 2017;1(4): 31–38. (In Russian).
12. Bakiev MR. Analiz problem nadezhnoi i bezopasnoi ekspluatatsii gruntovykh plotin vodokhranilishchnykh gidrouzlov [Analysis of Problems of Reliable and Safe Operation of Earthfill Dams of Reservoir Hydraulic Complexes]. ***Irrigation and Melioration.*** 2018;3: 14–17. (In Russian).
13. Mazurov BT. Geodinamicheskie sistemy (teoreticheskie osnovy kachestvennogo issledovaniya gorizontal'nykh dvizhenii) [Geodynamic Systems (Theoretical Foundations of Qualitative Research of Horizontal Movements)]. ***Vestnik SSUGT.*** 2016;1(33): 26–35. (In Russian).

14. Sainov MP, Boldin AA. Vzaimosvyaz' napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i porovogo davleniya v kamenno-zemlyanoi plotine [Relationship Between the Stress-Strain State and Pore Pressure in an Earth-Rock Fill Dam]. ***Russian Journal of Building Construction and Architecture.*** 2025;2(78): 38–48. (In Russian). DOI:10.36622/2541-7592.2025.78.2.003.
15. Bihanga B. Otsenka izmeneniya urovnya vodokhranilishcha plotiny Rvegura po p'ezometricheskim dannym [Assessment of Changes in the Reservoir Level of the Rwegura Dam Based on Piezometric Data]. ***Advances in Current Natural Sciences.*** 2025;2: 32–37. (In Russian). DOI:10.17513/use.38375.
16. Demenkov PA, Goldobina LA, Trushko OV. Metod prognoza deformatsii zemnoi poverkhnosti pri ustroistve kotlovanov v usloviyakh plotnoi gorodskoi zastroiki s primeneniem sposoba “stena v grunte” [Method for Predicting Ground Surface Deformation During the Construction of Pits in Dense Urban Areas Using the “Wall in the Ground” Method]. ***Journal of Mining Institute.*** 2018;233: 480–486. (In Russian). DOI:10.31897/PMI.2018.5.480.
17. Bezrodnyi KP, Lebedev MO. O nagruzkakh ot gornogo davleniya na obdelki tonnelei zakrytogo sposoba rabot [About Rock Pressure Loads on Tunnel Linings Constructed Using Trenchless Method]. ***Journal of Mining Institute.*** 2017;228: 649–653. (In Russian). DOI:10.25515/PMI.2017.6.649.

author **Bienvenu Bihanga**
State University of Land Use Planning, Moscow, Russia
Department of Geodesy and Geoinformatics, Faculty of Real Estate Cadastre and Spatial Data Infrastructure
0009-0006-2709-7078

**Submitted: July 23, 2025. Accepted: February 20, 2026. Published: February 27, 2026.**

УДК 528.8
DOI:10.30533/GiA-2026-004

CC BY

# Применение методов экспертного оценивания в задачах космического мониторинга строительства заводов по производству сжиженного природного газа

**М.А. Сквазников**[1] ✉, **Д.Л. Колыгин**[1], **А.В. Марков**[1], **М.О. Иванец**[1]

[1] Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
✉ vka@mil.ru

**цитирование** Сквазников М.А., Колыгин Д.Л., Марков А.В., Иванец М.О. Применение методов экспертного оценивания в задачах космического мониторинга строительства заводов по производству сжиженного природного газа // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 1. С. 64–76. DOI:10.30533/GiA-2026-004.

**ключевые слова** завод по производству сжиженного природного газа, технологическая схема, этап строительства, функциональная зона предприятия, экспертное оценивание, космический мониторинг

**аннотация** В предлагаемом исследовании рассмотрены методы использования спутникового дистанционного зондирования Земли для наблюдения за критически важными промышленными объектами на всех стадиях их жизненного цикла. Разработан подход, основанный на разделении объекта на функциональные зоны, что позволяет идентифицировать ключевые элементы инфраструктуры (здания, сооружения, оборудование), которые влияют на производственные процессы. Представлена топологическая модель завода по производству сжиженного природного газа, структурированная по функциональным зонам. Доказана эффективность космического мониторинга на разных стадиях строительства, включая предварительный анализ территории; контроль соблюдения нормативов и сроков; оптимизацию логистики; мониторинг санитарно-защитных зон; оценку состояния оборудования. В статье показаны примеры эталонов типовых состояний завода по производству сжиженного природного газа на различных этапах строительства, сформированные на основе анализа данных космической съемки и связанные с основными видами выполняемых при строительстве работ. В результате проведенного экспертного опроса получена матрица значений рейтингов наблюдаемых признаков в целях распознавания по данным космической съемки мероприятий, относящихся к различным этапам строительства завода по производству сжиженного природного газа.

# 1 Введение

Компания АО «Терра Тех» (центр Роскосмоса в области геотехнологий и искусственного интеллекта для обработки спутниковых данных) активно продвигает свои сервисы для информационного обеспечения решения различных хозяйственных задач, мониторинга социально-экономических процессов и реализации крупных проектов. В рамках платформы «Цифровая Земля»[1] выделено семь направлений, включая строительный контроль, где спутниковые снимки применяются для выбора оптимальных площадок под строительство, анализа логистических цепочек, мониторинга динамики работ. В таком отраслевом направлении, как строительный контроль, материалы космической съемки могут быть использованы на ранних этапах проектирования для выбора оптимального расположения новых объектов строительства.

При реализации инфраструктурных строительных проектов ключевое значение приобретает оптимизация логистики строительных материалов. Спутниковый мониторинг обеспечивает оперативное выявление месторождений нерудных полезных ископаемых (песчаных, гравийных, известняковых и других карьеров) вблизи строительной площадки, а также позволяет анализировать потенциальные транспортные коридоры для доставки сырья. Полученные сведения способствуют минимизации транспортных расходов и сокращению сроков поставки [1, 2].

Анализ снимков за разные даты позволяет оценивать динамику и сравнивать фактические работы на объекте строительства с плановой документацией[2].

Вместе с тем предлагаемые решения носят общий характер и не позволяют оценить возможность космического мониторинга строительства конкретного объекта. Кроме того, интерпретация состояния сложных технических объектов по космическому снимку представляет собой нетривиальную аналитическую задачу и требует привлечения высококвалифицированных специалистов.

В предлагаемой статье оцениваются возможности космического мониторинга крупнотоннажных заводов по производству сжиженного природного газа (СПГ), которые являются особо значимыми объектами современной промышленности.

Научная новизна исследования определяется использованием методов экспертного оценивания значений рейтингов наблюдаемых признаков в целях распознавания мероприятий различных этапов строительства СПГ-завода по результатам космической съемки.

# 2 Материалы и методы

Глобальная неопределенность начала XXI века в области энергоресурсов привела к росту роли природного газа в мировом энергетическом балансе [3]. Неравномерное потребление газа в течение года, нецелесообразность и небезопасность его хранения в компримированном виде обусловили необходимость сжижения природного газа[3] [4, 5].

Ключевая функция СПГ заключается в формировании стратегических запасов для компенсации сезонных пиков потребления газа[4]. Кроме того, сжижение

1 Цифровая Земля. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://dgearth.ru (дата обращения: 18.05.2025).

2 Савиных В.П., Кучко А.С., Цветков В.Я. Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования. М.: Картгеоцентр-Геодезиздат, 2001. 228 с.

3 Сжиженный природный газ: проблемы и перспективы: тезисы докладов II Всероссийской научно-практической конференции / отв. ред. Е.Б. Федорова. М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2023. 175 с.

4 Мысак Н.Б., Марченко М.В. Сжиженный природный газ: перспективы развития. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://moluch.ru/archive/179/46327/ (дата обращения: 13.02.2025).

природного газа существенно упрощает его транспортировку [6, 7]. Жидкая форма газа широко востребована в промышленном секторе, транспортной отрасли и агропромышленном комплексе[5].

Производственные мощности СПГ-заводов классифицируются по объему выпускаемой продукции:

- малотоннажные установки (тысячи тонн/год) [8–10];
- крупнотоннажные предприятия (свыше 3 млн тонн/год) [11];
- комплексы для сезонного регулирования потребления.

Мировой рынок СПГ в основном представлен крупнотоннажными заводами, которые располагаются в непосредственной близости от месторождений, ориентированы на экспортные поставки и размещаются в регионах с высокой газодобычей и низким местным потреблением.

На заводах по производству СПГ осуществляются подготовка и сжижение природного газа, хранение и отпуск СПГ потребителям [12].

Технологический цикл СПГ-производства включает несколько ключевых этапов[6]:

- прием сырья через магистральные трубопроводы;
- очистку от примесей и подготовку газа;
- процесс сжижения;
- хранение в специализированных резервуарах;
- отгрузку конечным потребителям (в цистернах, газовозах или по трубопроводам)[7].

**Рис. 1**
Обобщенная технологическая схема основных производственных процессов на заводах по производству СПГ

**Fig. 1**
Generalized technological diagram of the main production processes carried out at LNG production plants




На рис. 1 представлена принципиальная схема технологического процесса производства СПГ.

На территории завода по производству СПГ в общем случае выделяются следующие функциональные зоны:

- зона основного производства, которая предназначена для приема, подготовки и сжижения природного газа, а также хранения и отпуска СПГ потребителям;
- вспомогательные производственные зоны предприятия (зона обеспечения эксплуатационной готовности, предназначенная для размещения инфраструктуры, поддерживающей работоспособность основного технологического оборудования, зданий и сооружений производственного комплекса; административно-хозяйственная зона, включающая объекты для организации производственных процессов, обеспечения безопасности предприятия и обслуживания персонала) [13].

На рис. 2 представлена схема расположения основных элементов оборудования крупнотоннажного завода «Ямал СПГ».

В зоне основного производства функционально значимыми являются следующие структурные элементы завода:

- резервуарный парк для хранения СПГ;
- узел коммерческого учета и регулирования давления газа;
- модуль предварительной подготовки газа;
- компрессорная станция;
- линия сжижения природного газа;
- ректификационная установка;
- причальные сооружения с наливными терминалами, системой шланговых соединений и переходными устройствами для стыковки с судовым оборудованием;
- автомобильные наливные станции.

5 Рачевский Б.С. Сжиженные углеводородные газы: LPG, LNG, GTL. М.: Нефть и газ, 2009. 640 с.

6 Вовк В.С., Никитин Б.А., Новиков А.И. и др. Крупномасштабное производство сжиженного природного газа: учеб. пособие. М.: Недра, 2011. 242 с.

7 Гречко А.Г., Новиков А.И., Харченко Ю.А. Заводы по производству СПГ в Арктике. Транспортировка газа судами-газовозами: учеб. пособие. М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2020. 292 с.

**Условные обозначения**

1. пункты приема, замера, редуцирования и подготовки природного газа
2. линии производства СПГ по технологии APCI C3MR
3. линии производства СПГ по технологии «Арктический каскад»
4. резервуары для хранения СПГ
5. строительная площадка новых резервуаров для хранения СПГ
6. причалы для швартовки судов-газовозов
7. судно-газовоз типа «Ямалмакс»
8. тепловая электростанция
9. факельное хозяйство
10. резервуары для хранения газового конденсата
11. диспетчерская
12. склад материалов, оборудования и запасных частей

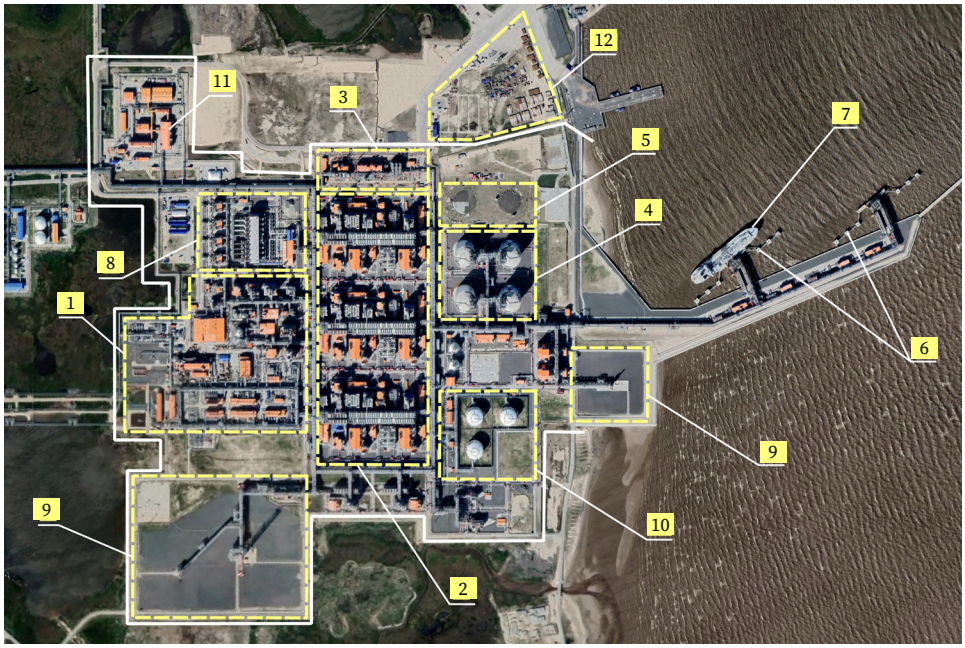



**Рис. 2**
Схема оборудования завода «Ямал СПГ»

**Fig. 2**
Yamal LNG plant equipment diagram

## 3 Результаты и обсуждение

Спутниковые технологии обеспечивают эффективный контроль на подготовительном этапе строительства в ходе проведения работ по созданию временной строительной инфраструктуры (рис. 3). Космический мониторинг позволяет:

- детально наблюдать за динамикой строительства;
- контролировать соблюдение технологических нормативов;
- фиксировать этапы создания критической инфраструктуры.

**Организация площадки для приема материалов /** Organization of sites for receiving materials



**Организация площадки для приема конструкций /** Organization of sites for receiving structures



**Обустройство зон складирования сыпучих материалов /** Arrangement of storage areas for bulk materials





**Возведение гидротехнических сооружений, включающее строительство многофункционального причального комплекса и монтаж транспортной эстакады /** Construction of hydraulic structures, including the construction of a multifunctional berthing complex and installation of a transport overpass

**Рис. 3**
Космические снимки подготовительного этапа строительства СПГ-завода

**Fig. 3**
Satellite images of the preparatory stage of construction of an LNG plant

На стадии активного строительства спутниковый мониторинг помогает осуществлять:

- оперативный контроль мероприятий основного этапа строительства (соблюдение графиков строительства, технического состояния ключевых объектов и динамика выполнения работ) [14];
- наблюдение за критически важными элементами: технологическими модулями, инженерными коммуникациями и транспортной инфраструктурой[8].

Преимущества космического мониторинга состоят:

- в возможности регулярного обзора всей строительной площадки;
- объективной фиксации прогресса строительства;
- своевременном выявлении отклонений от проектных решений;
- документировании этапов возведения объектов.

При ведении космического мониторинга особое внимание уделяется соответствию фактических объемов работ плановым показателям, технологической последовательности строительных процессов, готовности объектов к вводу в эксплуатацию.

Использование данных дистанционного зондирования Земли обеспечивает повышение эффективности строительного надзора, снижение рисков нарушения сроков, оптимизацию управления строительным процессом. Так, на рис. 4 показано, как проводится контроль основных операций при строительстве наземных резервуаров.

Одним из видов контроля основного этапа строительства является мониторинг количества и типов ремонтно-строительной (автомобильные и гусеничные краны, экскаваторы, бульдозеры, грейдеры) и транспортной техники (рис. 5).

Контроль за ходом строительства технологических линий по сжижению природного газа продемонстрирован на рис. 6, где показаны этапы строительства блока компрессорных станций с газовыми турбинами. Отмечаются гусеничные краны и автотранспортная техника.

На рис. 7 представлены этапы строительства одного из элементов оборудования трехкаскадного цикла сжижения природного газа — установки охлаждения этиленом. Отмечается монтаж теплообменных аппаратов, трубопроводов. На строительной площадке находится гусеничный кран.

**Рис. 4**
Космические снимки различных этапов строительства наземного резервуара СПГ

**Fig. 4**
Satellite images of various stages of construction of a ground-based LNG tank



**Земляные работы — профилирование строительной площадки, размещение техники, металлических и бетонных конструкций, строительных сыпучих материалов /** Excavation work – profiling of the construction site, placement of equipment, metal and concrete structures, construction bulk materials



**Установка свайного поля фундамента резервуара /** Installation of a tank foundation pile field



**Сборка конструкции наружной стенки и монтаж внутреннего корпуса из нержавеющей стали /** Assembly of the outer wall structure and installation of the inner stainless steel casing



**Монтаж крыши резервуара /** Tank roof installation

8 Нефтегазовое строительство: учеб. пособие / под общ. ред. проф. И.И. Мазура и проф. В.Д. Шапиро. М.: ОМЕГА-Л, 2005. 774 с.

**Рис. 5**
Ремонтно-строительная и транспортная техника

**Fig. 5**
Repair, construction and transport machinery



**Рис. 6**
Космические снимки
этапов строительства блока
компрессорных станций

**Fig. 6**
Satellite images
of the construction stages
of a block of compressor stations



**Рис. 7**
Космические снимки этапов строительства установки охлаждения этиленом

**Fig. 7**
Satellite images of the construction stages of an ethylene cooling plant



Таким образом, каждое из мероприятий подготовительного и основного этапов строительства завода по производству СПГ характеризуется определенными признаками — элементами оборудования, строительными материалами, автотранспортной и строительной техникой.

Вследствие малого объема выборки наблюдаемых событий применение статистических методов обработки результатов космического мониторинга для описания классов распознаваемых событий на языке наблюдаемых признаков не представляется корректным. По этой причине предлагается использовать экспертные методы оценивания рассматриваемых альтернатив [15].

Получение численных оценок альтернатив производилось по методу Черчмена — Акофа[9]. Выбор результирующих отношений предпочтения производился путем отыскания медианы Кемени для метризованных ранжирований[10]:

1 $$M^*(P_1,P_2,\ldots,P_m) = P^* = arg \min_{P} \sum_{v=1}^{m} \sum_{i<j} \left| w_{ij}^* - w_{ij}^{(v)} \right|,$$

где $P_i$ — ранжирование, проведенное $i$-м экспертом;
$m$ — количество экспертов;

2 $$w_{ij} = f'(a_i) - f'(a_j),$$

при этом $f'(a_i)$ — нормированная оценка $i$-й альтернативы.

Элементы матрицы отношений аддитивного ранжирования $P^*$ определяются по формуле

3 $$w_{ij}^* = W_i - W_j,$$

4 где $W_i = \sum_{l=1}^{n} \sum_{v=1}^{m} w_{il}^{(v)} / (mn),$

5 $W_j = \sum_{l=1}^{n} \sum_{v=1}^{m} w_{jl}^{(v)} / (mn),$

при этом $n$ — количество оцениваемых альтернатив.

Результатом проведенного экспертного опроса явилась матрица значений рейтингов наблюдаемых признаков распознаваемых мероприятий, относящихся к различным этапам строительства завода по производству СПГ (табл. 1).

Полученную матрицу значений рейтингов наблюдаемых признаков предполагается использовать для распознавания по результатам космической съемки мероприятий, имеющих отношение к различным этапам строительства СПГ-завода.

9 Литвак Б.Г. Экспертная информация: методы получения и анализа. М.: Радио и связь, 1982. 184 с.

10 Кемени Дж., Снелл Дж. Кибернетическое моделирование. М.: Советское радио, 1972. 192 с.

**Таблица 1**
Матрица значений рейтингов наблюдаемых признаков

**Table 1**
Matrix of rating values for observed features

| ПРИЗНАКИ / МЕРОПРИЯТИЕ | Профилированная строительная площадка | Металлические и бетонные конструкции | Строительные сыпучие материалы | Сваи фундамента | Элементы корпуса резервуара | Теплообменные аппараты | Трубопроводы | Автомобильные и гусеничные краны | Экскаваторы, бульдозеры, грейдеры | Автотранспортная техника |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Оборудование строительно-монтажной базы** | 0,31 | 0,81 | 0,72 | 0,35 | 0,12 | 0,04 | 0,07 | 0,87 | 0,89 | 0,93 |
| **Оборудование площадок для хранения сыпучих стройматериалов** | 0,51 | 0,37 | 0,93 | 0,21 | 0,07 | 0,11 | 0,38 | 0,22 | 0,77 | 0,80 |
| **Строительство причального сооружения** | 0,48 | 0,74 | 0,56 | 0,55 | 0,12 | 0,02 | 0,31 | 0,69 | 0,67 | 0,89 |
| **Подготовка строительной площадки** | 0,93 | 0,30 | 0,72 | 0,34 | 0,08 | 0,05 | 0,20 | 0,36 | 0,85 | 0,91 |
| **Установка свайного поля фундамента резервуара** | 0,84 | 0,55 | 0,47 | 0,22 | 0,11 | 0,13 | 0,24 | 0,44 | 0,32 | 0,57 |
| **Сборка конструкции и монтаж корпуса** | 0,12 | 0,77 | 0,23 | 0,14 | 0,89 | 0,21 | 0,33 | 0,88 | 0,24 | 0,58 |
| **Монтаж теплообменных аппаратов** | 0,11 | 0,85 | 0,31 | 0,21 | 0,97 | 0,89 | 0,87 | 0,51 | 0,20 | 0,67 |
| **Монтаж блока компрессорных станций** | 0,09 | 0,88 | 0,22 | 0,06 | 0,33 | 0,21 | 0,58 | 0,91 | 0,31 | 0,82 |

# 4 Выводы

Активное развитие цифровых космических сервисов на основе данных космической съемки обуславливает необходимость поиска новых научно-методических подходов к применению современных инструментов и технологий для контроля состояния особо важных промышленных объектов на всех этапах жизненного цикла.

Проведенное исследование подтверждает высокую эффективность и практическую значимость методов для мониторинга строительства таких сложных и стратегически важных объектов, как СПГ-заводы. Применение космического мониторинга в сочетании с методами экспертного оценивания позволяет перейти от общих наблюдений к целенаправленному и детальному анализу.

Перечислим ключевые результаты и возможности, которые открывает использование средств дистанционного зондирования Земли для мониторинга строительства СПГ-заводов.

1. Обеспечивается комплексный контроль на всех этапах жизненного цикла объекта. Космическая съемка предоставляет возможности не только для выбора площадки на этапе проектирования, но и для непрерывного контроля за ходом строительства — от подготовительных земляных работ до монтажа сложного технологического оборудования.
2. Формализуется процесс распознавания и перевода экспертных знаний в приемлемую для алгоритмизации форму. Разработанная матрица рейтингов наблюдаемых признаков является основным научно-практическим результатом. Она позволяет систематизировать визуальные признаки различных строительных мероприятий (наличие кранов, свай, профилированной площадки и т. д.) и количественно оценить их значимость для идентификации каждого этапа. Это снижает субъективность анализа и закладывает основу для создания автоматизированных систем распознавания.

3. Повышается оперативность и объективность контроля. Анализ разновременных космических снимков позволяет:
   - сравнивать фактические сроки и объемы работ с плановыми показателями;
   - контролировать логистику (отслеживать движение техники, создание и использование площадок для хранения материалов, оптимизируя тем самым цепочки поставок);
   - мониторить соблюдение нормативных параметров, например санитарно-защитных зон.
4. Выполняется декомпозиция сложного объекта для целенаправленного наблюдения. Предложенный подход к функциональному зонированию территории СПГ-завода и выделению ключевых элементов оборудования (резервуары, компрессорные станции, причалы) позволяет фокусировать внимание на наиболее критических компонентах, определяющих производственный процесс. Показаны примеры эталонов типовых состояний, что создает библиотеку образов для сравнения.
5. Преодолеваются ограничения малых выборок. Для таких уникальных объектов, как крупнотоннажные СПГ-заводы, применение классических статистических методов затруднено из-за недостатка данных. Использование метода экспертного оценивания (Черчмена — Акофа) доказало свою эффективность для получения надежных количественных оценок в условиях ограниченной статистики.

Таким образом, интеграция данных космической съемки с методами экспертного оценивания создает мощный аналитический инструмент. Он не только расширяет возможности традиционного визуального мониторинга, но и обеспечивает переход к количественной, формализованной и объективной оценке хода строительства. Это позволяет принимать более обоснованные управленческие решения, минимизировать риски срыва сроков и оптимизировать затраты на реализацию масштабных промышленных проектов.

## библиография


1. Цветков В.Я. Анализ применения космического мониторинга // Перспективы науки и образования. 2015. Т. 3, № 15. С. 48–55.
2. Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Стратилов Н.Р. и др. Космический аппарат «Ресурс-П» // Геоматика. 2010. № 4. С. 23–26.
3. Емельянов В.В. Современные тенденции развития мирового рынка СПГ // Российский внешнеэкономический вестник. 2020. № 3. С. 112–121.
4. Никитин В.С., Симонов Ю.А., Половинкин В.Н. Перспективы развития отечественных арктических морских технологий, связанных со сжиженным природным газом // Арктика: экология и экономика. 2018. № 2 (30). С. 68–82. DOI:10.25283/2223-4594-2018-2-68-82.
5. Merkulov V.I., Skripnuk D.F., Kulik S.V. Analysis of World LNG Production Capacity // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 539. P. 012057. DOI:10.1088/1755-1315/539/1/012057.
6. Иванов Л.В., Баранов А.Ю., Плужникова Д.В. Перспективы использования водного транспорта СПГ для автономной газификации отдаленных регионов // Газовая промышленность. 2020. № 2 (796). С. 52–58.
7. Драпак К.А., Крылов Е.Г., Макаров А.М. и др. Перспективы развития проектов по производству СПГ в России // Известия ВолгГТУ. 2021. № 8 (255). С. 65–68. DOI:10.35211/1990-5297-2021-8-255-65-68.
8. Федорова Е.Б. Современное состояние и развитие мировой индустрии сжиженного природного газа: технологии и оборудование. М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2011. 159 с.
9. Гречко А.Г., Новиков А.И. Оптимизация производства сжиженного природного газа при разработке морских месторождений // Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2010. № S1. С. 203–213.
10. Рожнятовский Г.И., Нуржиц С.И., Ванчугов И.М. и др. Газоперерабатывающая отрасль России, анализ и перспективы ее развития // Нефтегазохимия. 2020. № 2. С. 47–54. DOI:10.24411/2310-8266-2020-10210.

11. Зеленов П.А., Боровков М.Н., Зеленов С.Н. и др. Оборудование и процессы крупнотоннажного производства СПГ // Транспортные системы. 2022. № 1 (23). С. 33–42. DOI:10.46960/62045-2022-1-33.
12. Матюшкин С.Н., Салимова А.Р., Хафизова С.Р. Обзор технологий получения сжиженного природного газа // Нефтегазовое дело. 2026. № 1. С. 265–285. DOI:10.17122/ogbus-2026-1-265-285.
13. Medvedeva O.N., Perevalov S.D., Sklyarov K.A., et al. Development of Recommendations for the Creation of Liquefied Natural Gas Infrastructure // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2023. № 3 (59). P. 36–46. DOI:10.36622/VSTU.2023.3.59.004.
14. Тихомиров А.В. Строительство среднетоннажного СПГ-завода в арктической зоне России // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2021. Т. 11, № 11А. С. 279–290. DOI:10.34670/AR.2021.92.64.035.
15. Сквазников М.А., Колыгин Д.Л., Торшина И.П. Применение математического аппарата теории возможностей для семантического описания признаков объектов дистанционного зондирования Земли // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2022. Т. 66, № 2. С. 6–19. DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-2-6-19.

## авторы

**Сквазников Михаил Алексеевич**
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» МО РФ, Санкт-Петербург, Россия
кафедра оптико-электронных средств, факультет сбора и обработки информации
канд. техн. наук, доцент
0000-0002-5166-0514

**Колыгин Дмитрий Леонидович**
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» МО РФ, Санкт-Петербург, Россия
кафедра оптико-электронных средств, факультет сбора и обработки информации
0000-0002-2233-9721

**Марков Андрей Викторович**
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» МО РФ, Санкт-Петербург, Россия
Военный институт (научно-исследовательский)
канд. техн. наук
0009-0006-8799-8943

**Иванец Максим Олегович**
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» МО РФ, Санкт-Петербург, Россия
Военный институт (научно-исследовательский)
канд. техн. наук
0009-0008-1588-2217

**Поступила 21.05.2025. Принята к публикации 20.02.2026. Опубликована 27.02.2026.**

UDC 528.8
DOI:10.30533/GiA-2026-004

CC BY

# Application of Expert Assessment Methods in Problems of Space Monitoring of Construction of Liquefied Natural Gas Plants

**Mikhail A. Skvaznikov**[1] ✉, **Dmitrii L. Kolygin**[1], **Andrey V. Markov**[1], **Maksim O. Ivanets**[1]

[1] Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia
✉ vka@mil.ru

**citation** Skvaznikov MA, Kolygin DL, Markov AV, Ivanets MO. Application of Expert Assessment Methods in Problems of Space Monitoring of Construction of Liquefied Natural Gas Plants. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2026;70(1): 64–76. DOI:10.30533/GiA-2026-004.

**keywords** liquefied natural gas plant, technological scheme, construction stage, functional zone of the industrial enterprise, expert assessment, space monitoring

**abstract** The study considers the methods of using satellite remote sensing of the Earth to monitor critical industrial facilities at all stages of their life cycle. An approach has been developed based on dividing the facility into functional zones, which helps identify key infrastructure elements (buildings, structures, equipment) that affect production processes. A topological model of a liquefied natural gas (LNG) plant structured by functional zones is presented. The effectiveness of space monitoring at different stages of construction has been proven, including preliminary analysis of the territory; control over compliance with standards and deadlines; logistics optimization; monitoring of sanitary protection zones; and assessment of the condition of equipment. Examples of standards of typical conditions of a liquefied natural gas plant at different stages of construction are shown, formed on the basis of analysis of space imagery data and related to the main types of work performed during construction. As a result of the expert survey, a matrix of rating values of the observed features was obtained in order to recognize events at various stages of the LNG plant construction based on space imagery data.

**references**

1. Tsvetkov VYa. Analiz primeneniya kosmicheskogo monitoringa [Analysis of the Use of Space Monitoring]. *Perspectives of Science & Education.* 2015;3(15): 48–55. (In Russian).
2. Kirilin AN, Akhmetov RN, Stratilov NR, et al. Kosmicheskii apparat “Resurs-P” [The Resurs-P Spacecraft]. *Geomatics.* 2010;4: 23–26. (In Russian).

3. Emel'yanov VV. Sovremennye tendentsii razvitiya mirovogo rynka SPG [Current Trends in Global LNG Market]. ***Russian Foreign Economic Journal.*** 2020;3: 112–121. (In Russian).
4. Nikitin VS, Simonov YA, Polovinkin VN. Perspektivy razvitiya otechestvennykh arkticheskikh morskikh tekhnologiy, svyazannykh so szhizhennym prirodnym gazom [Prospects of the Development of Domestic Arctic Marine Technologies Related to Liquefied Natural Gas]. ***Arctic: Ecology and Economy.*** 2018;2(30): 68–82. (In Russian). DOI:10.25283/2223-4594-2018-2-68-82.
5. Merkulov VI, Skripnuk DF, Kulik SV. Analysis of World LNG Production Capacity. ***IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.*** 2020;539: 012057. DOI:10.1088/1755-1315/539/1/012057.
6. Ivanov LV, Baranov AY, Pluzhnikova DV. Perspektivy ispol'zovaniya vodnogo transporta SPG dlya avtonomnoy gazifikatsii otdal'onnykh regionov [Prospects for the Use of Waterborne LNG Transport for Autonomous Gasification of Remote Regions]. ***Gas Industry Journal.*** 2020;2: 52–58. (In Russian).
7. Drapak KA, Krylov EG, Makarov AM, et al. Perspektivy razvitiya proektov po proizvodstvu SPG v Rossii [The Prospects for the Development of LNG Production Projects in Russia]. ***Izvestia VSTU.*** 2021;8(255): 65–68. (In Russian). DOI:10.35211/1990-5297-2021-8-255-65-68.
8. Fedorova EB. ***Sovremennoye sostoyaniye i razvitiye mirovoy industrii szhizhennogo prirodnogo gaza: tekhnologii i oborudovaniye*** [Current State and Development of the Global Liquefied Natural Gas Industry: Technologies and Equipment]. Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas; 2011. 159 p. (In Russian).
9. Gretchko AG, Novikov AI. Optimizatsiya proizvodstva szhizhennogo prirodnogo gaza pri razrabotke morskikh mestorozhdeniy [Optimization of Liquefied Natural Gas Production in Offshore Development]. ***Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering.*** 2010;S1: 203–213. (In Russian).
10. Rozhnyatovskiy GI, Nurzhits SI, Vanchugov IM, et al. Gazopererabatyvayushchaya otrasl' Rossii, analiz i perspektivy eyo razvitiya [Gas Processing Industry of Russia, Analysis and Prospects for Its Development]. ***Oil & Gas Chemistry.*** 2020;2: 47–54. (In Russian). DOI:10.24411/2310-8266-2020-10210.
11. Zelenov PA, Borovkov MN, Zelenov SN, et al. Oborudovaniye i protsessy krupnotonnazhnogo proizvodstva SPG [Equipment and Processes for Large-Scale LNG Production]. ***Transport Systems.*** 2022;1(23): 33–42. (In Russian). DOI:10.46960/62045-2022-1-33.
12. Matyushkin SN, Salimova AR, Khafizova SR. Obzor tekhnologiy polucheniya szhizhennogo prirodnogo gaza [Overview of Technologies for Liquefied Natural Gas Production]. ***Oil and Gas Business.*** 2026;1: 265–285. (In Russian). DOI:10.17122/ogbus-2026-1-265-285.
13. Medvedeva ON, Perevalov SD, Sklyarov KA, et al. Development of Recommendations for the Creation of Liquefied Natural Gas Infrastructure. ***Russian Journal of Building Construction and Architecture.*** 2023;3(59): 36–46. DOI:10.36622/VSTU.2023.3.59.004.
14. Tikhomirov AV. Stroitel'stvo srednetonnazhnogo zavoda SPG v Arkticheskoy zone Rossii [Construction of a Medium-Scale LNG Plant in the Arctic Zone of Russia]. ***Economics: Yesterday, Today and Tomorrow.*** 2021;11(11A): 279–290. (In Russian). DOI:10.34670/AR.2021.92.64.035.
15. Skvaznikov MA, Kolygin DL, Torshina IP. Primenenie matematicheskogo apparata teorii vozmozhnostei dlya semanticheskogo opisaniya priznakov ob"ektov distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Application of the Mathematical Apparatus of the Theory of Possibilities for the Semantic Description of Features of Objects of Remote Sensing of the Earth]. ***Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying.*** 2022;66(2): 6–19. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-2-6-19.



**authors** **Mikhail A. Skvaznikov**
Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia
Department of Optical-Electronic Devices, Faculty of Information Collection and Processing
PhD in Engineering, Associate Professor
0000-0002-5166-0514

**Dmitrii L. Kolygin**
Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia
Department of Optical-Electronic Devices, Faculty of Information Collection and Processing
0000-0002-2233-9721

**Andrey V. Markov**
Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia
Military Research Institute
PhD in Engineering
0009-0006-8799-8943

**Maksim O. Ivanets**
Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia
Military Research Institute
PhD in Engineering
0009-0008-1588-2217

**Submitted: May 21, 2025. Accepted: February 20, 2026. Published: February 27, 2026.**

УДК 528.94:551.58
DOI:10.30533/GiA-2026-005

CC BY

# Картографирование климатических условий для сельского хозяйства в бассейне реки Конго

**Лионель Гемджо**[1] ✉, **Г.И. Загребин**[1]

[1] Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия
✉ lionelguemdjo@gmail.com

**цитирование** Гемджо Лионель, Загребин Г.И. Картографирование климатических условий для сельского хозяйства в бассейне реки Конго // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 1. С. 77–90. DOI:10.30533/GiA-2026-005.

**ключевые слова** агроклиматическое зонирование, бассейн реки Конго, климатический риск, геоинформационное картографирование, дистанционное зондирование, реанализ, осадки, температура

**аннотация** В статье систематизированы ключевые проблемы климатического картографирования для сельского хозяйства бассейна реки Конго и предложена воспроизводимая технология построения серии агроклиматических карт, пригодных для последующей интеграции в модели риска. Рассматриваются основные проблемы: дефицит и неоднородность метеоданных, сложность валидации продуктов реанализа и спутниковых оценок осадков, влияние рельефа и лесного покрова на конвекцию, а также требования к сопоставимости климатических индикаторов для разных агросистем. Предложена схема формирования базы климатических переменных (температура воздуха, осадки, влажностные индексы, длительность вегетационного периода), их нормализация к единому периоду (1991–2020 годы), оценка неопределенности путем межпродуктового сравнения и перекрестной проверки по доступным станциям. На основе классификации Кёппена — Гейгера, индексов засушливости и сезонности осадков выделены ключевые агроклиматические зоны и очаги климатических рисков (засуха, переувлажнение, тепловой стресс). Показано, что совмещение климатических карт с данными о почвах, рельефе и расселении создает основу для последующей оценки природных рисков и поддержки принятия решений в землепользовании.

# 1 Введение

Бассейн реки Конго — один из ключевых природно-ресурсных регионов Тропической Африки в экваториальной зоне, где сельское хозяйство опирается преимущественно на дождевое увлажнение и чувствительно к межгодовой изменчивости осадков, сезонности и экстремальным температурам[1,2,3]. На фоне глобального потепления для региона усиливается сочетание таких рисков, как засуха и переувлажнение, рост частоты теплового стресса, смещение сроков начала сезонов дождей и повышение неопределенности агротехнологических решений[1,2].

Для бассейна реки Конго характерна высокая конвективная изменчивость и выраженная роль лесного покрова во влагообороте, что затрудняет интерпретацию трендов и согласование различных климатических продуктов [1–4]. Даже при наличии спутниковых снимков на разные даты и реанализа остаются такие проблемы, как пространственная неоднородность, неточность оценки осадков вблизи горных систем, нехватка наземных наблюдений для проверки [1–3].

В этих условиях особое значение приобретает геоинформационное картографирование климатических условий как связующее звено между климатологическими данными и задачами территориального планирования, агроэкологической оценки и управления природными рисками. Цель настоящей работы — систематизировать ключевые проблемы климатического картографирования для сельского хозяйства бассейна реки Конго и предложить воспроизводимую технологию построения серии агроклиматических карт, пригодных для последующей интеграции в модели риска.

# 2 Материалы и методы

## 2.1 Территория исследования

Бассейн реки Конго охватывает экваториальные и субэкваториальные ландшафты Центральной Африки и включает низменные области, плато и горные окраины (в том числе Восточно-Африканское плоскогорье). Климатические условия определяются взаимодействием атлантического муссона, внутриконтинентальной конвекции и сезонной миграции межтропической зоны конвергенции [1–4]. Внутрирегиональные контрасты проявляются в различиях годовых сумм осадков, длительности влажных и сухих сезонов, а также температурных градиентах, связанных с высотой и облачностью.

Площадь бассейна реки Конго превышает 3,6 млн км$^2$, поэтому определение границ водосборного бассейна только картографическим методом затруднительно. В работе применен метод геоинформационного анализа построения полигонов водосбора рек по цифровой модели рельефа. Верификация (и при необходимости уточнение) границ проводилась по картографическим материалам. За основу были взяты глобальные границы водосборов, полученные на базе данных HydroBASINS с разрешением 15″, что соответствует примерно 500 м на экваторе.

1 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. 2391 p.

2 Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 3056 p.

3 The State of Food Security and Nutrition in the World 2022. Repurposing Food and Agricultural Policies to Make Healthy Diets More Affordable / FAO, IFAD, UNICEF, WFP, WHO. Rome: FAO, 2022. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cc0639en (дата обращения: 05.01.2026).

## 2.2 Исходные данные

Методика опирается на многофакторный подход, предусматривающий совместное использование многоспектральных спутниковых данных, продуктов реанализа и климатологических поверхностей высокого разрешения. В качестве базовых наборов были использованы:

- комплект данных об атмосферных осадках CHIRPS (*англ.* Climate Hazards Center Infrared Precipitation with Stations) — для климатического анализа, сочетающего спутниковые и наземные данные [5];
- ERA5-Land — для температуры, влажности и производных энергетического баланса [6];
- WorldClim 2 — для климатических показателей [7];
- классификация Кёппена — Гейгера — для первичного климатического зонирования [8].

Для оценки контекстных факторов применялись глобальные слои почв (SoilGrids250m) [9], населения (WorldPop) [10] и гидрографической сети / границ водосборов (HydroSHEDS / HydroBASINS) [11, 12]. Динамика лесного покрова учитывалась по продуктам глобального мониторинга лесов на базе Landsat [13–15], а биофизическое состояние растительности — по индексам растительности, которые были получены с помощью спектрорадиометра с умеренным разрешением (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)[4].

Для сопоставимости расчетов все климатические переменные приводились к единой расчетной сетке и общему референсному периоду (1991–2020 годы) с фиксацией исходных периодов и разрешения в метаданных. Качество оценок контролировалось через сравнение наборов данных (например, CHIRPS vs. ERA5-Land по осадкам) и проверку по станционным данным, когда они доступны для выбранных стран бассейна.

## 2.3 Технологическая схема картографирования и индикаторы

Технологическая схема включает следующие этапы:

1) сбор и гармонизацию источников;
2) приведение к единой системе координат (WGS 84) и пространственному разрешению;
3) расчет агроклиматических индикаторов;
4) классификацию и картографическое обобщение;
5) подготовку карт к публикации.

К ключевым индикаторам отнесены: годовые и сезонные суммы осадков, средние и экстремальные температуры, индексы сезонности осадков, индексы засушливости (на основе соотношения «осадки — потенциальная испаряемость»), потенциальная продолжительность вегетационного периода и вероятность теплового стресса по пороговым значениям.

Для интеграции климатических индикаторов с факторами почв, рельефа и расселения в прикладных задачах планирования предлагается применять методы пространственного многокритериального анализа (*англ.* GIS-based Multi-Criteria Decision Analysis, GIS-MCDA), включая аналитическую иерархическую процедуру для обоснования весов критериев [16, 17]. Соответствующие подходы демонстрируют эффективность в задачах оценки пригодности земель и природно-аграрного потенциала при использовании геоинформационных технологий [18–20].

4 Huete A., Didan K., Miura T., et al. Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the MODIS Vegetation Indices // Remote Sensing of Environment. 2002. Vol. 83. Iss. 1–2. P. 195–213.

# 3 Результаты

Была создана серия карт, отражающая пространственную структуру климатических условий бассейна реки Конго и значимых для сельского хозяйства индикаторов. Карты подготовлены в едином картографическом стиле и масштабе. Помимо карт составлены наборы данных, включающие векторные слои с общегеографической информацией, а также тематические статистические поверхности по всем исследуемым показателям.

Первичное климатическое районирование выполнено на основе классификации Кёппена — Гейгера с уточнением границ по сезонности осадков и температурным условиям. Это позволяет выделять зоны с различной вероятностью ограничений по влаге и теплу, а также формировать основу для агроклиматического зонирования.

Согласно классификации Кёппена — Гейгера и с учетом ранее изложенных положений, в пределах Центральной Африки (включая бассейн реки Конго) выделяются следующие основные типы климата:

- Af — экваториальный влажный;
- Am — тропический муссонный;
- Aw — тропический с сухой зимой (саванновый);
- BSh — полузасушливый (степной) жаркий;
- BWh — засушливый (пустынный) жаркий;
- Cwa — умеренно теплый с сухой зимой и жарким летом;
- Cwb — умеренно теплый с сухой зимой и теплым летом.

Пространственное распределение указанных типов климата за период с 1991 по 2020 год отражено на рис. 1 [8].

Для получения тематических статистических поверхностей использовался инструмент Google Earth Engine, позволяющий получать данные дистанционного зондирования из общей базы космических снимков, обрабатывать их и экспортировать полученные результаты в формате GeoTIFF. Поля осадков и их сезонность рассчитаны на основе набора данных CHIRPS и сопоставлены с реанализом ERA5-Land. Технологическая схема расчета среднегодового количества осадков с 1991 по 2020 год по данным CHIRPS со скриптами представлена на рис. 2.

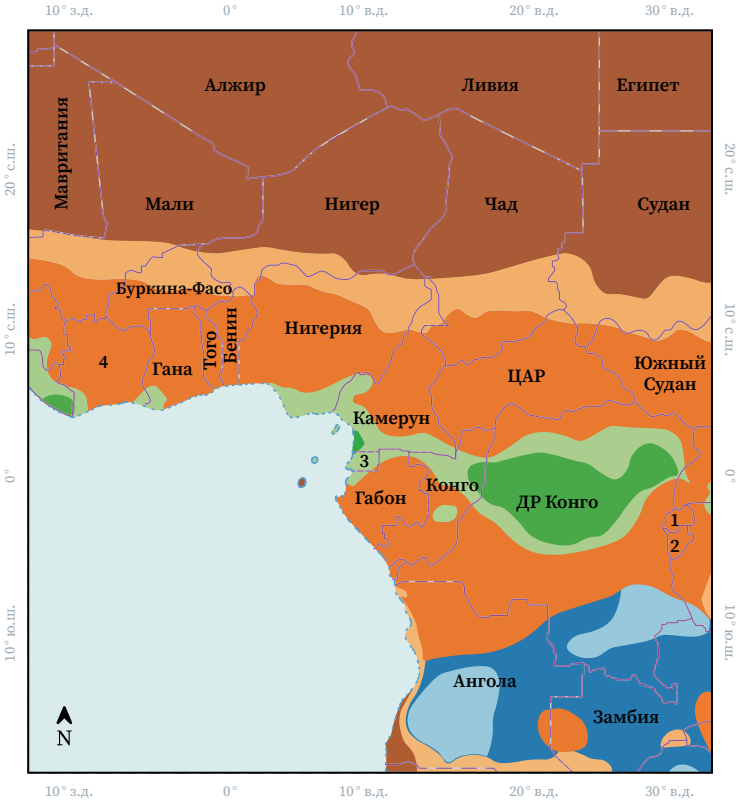



**Рис. 1**
Климатические типы по Кёппену — Гейгеру в бассейне р. Конго (референсный период — 1991–2020 гг.)

**Fig. 1**
Köppen – Geiger climate classes in the Congo River basin (baseline 1991–2020)

Условные обозначения

- Af
- Am
- Aw
- BWh
- BSh
- Cwa
- Cwb

1 Руанда
2 Бурунди
3 Экваториальная Гвинея
4 Кот-д'Ивуар

Масштаб 1 : 13 000 000

**Рис. 2**
Технологическая схема расчета среднегодового количества осадков с 1991 по 2020 г. по данным CHIRPS

**Fig. 2**
Technological scheme for calculating the average annual precipitation from 1991 to 2020 according to CHIRPS data

**1** Определение периода (1991–2020 гг.). Устанавливается временное окно, формируются списки лет (1991… 2020) и месяцев (1… 12)

```
var startYear = 1991;
var endYear = 2020;
var startDate = ee.Date.fromYMD(startYear, 1, 1);
var endDate = ee.Date.fromYMD(endYear + 1, 1, 1);
var years = ee.List.sequence(startYear, endYear);
var months = ee.List.sequence(1, 12);
```

**2** Загрузка CHIRPS и фильтрация по периоду. Загружается коллекция CHIRPS DAILY и фильтруется по датам. Выбирается полоса precipitation (мм/сут)

```
var chirps = ee.ImageCollection('UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY')
.filterDate(startDate, endDate)
.select('precipitation');
```

**3** Суточные → месячные суммы (мм/месяц). Для каждой пары «год — месяц» суммируются суточные значения внутри месяца, получаются месячные итоги

```
var monthlyByYM = ee.ImageCollection.fromImages(
years.map(function(y){
y = ee.Number(y);
return months.map(function(m){
m = ee.Number(m);
var d1 = ee.Date.fromYMD(y, m, 1);
var d2 = d1.advance(1, 'month');
var monthSum = chirps.filterDate(d1, d2).sum()
.rename('P')
.set({
'year': y,
'month': m,
'system:time_start': d1.millis()
});
return monthSum;
});
}).flatten()
);
```

**4** Годовые итоги (мм/год). Для каждого года суммируются 12 месячных слоев, получается годовая сумма осадков

```
var annualTotals = ee.ImageCollection.fromImages(
years.map(function(y){
y = ee.Number(y);
var annual = monthlyByYM.filter(ee.Filter.eq('year', y)).sum()
.rename('P_annual')
.set({
'year': y,
'system:time_start': ee.Date.fromYMD(y, 1, 1).millis()
});
return annual;
})
);
```

**5** Среднее за 1991–2020 гг. (MAP), мм/год. Усредняются годовые суммы: annualTotals.mean() → MAP, ограничивается область исследования (clip)

```
var MAP = annualTotals.mean()
.rename('MAP_mm_yr')
.clip(roi);
```

**6** Визуализация. Добавляется слой MAP на карту (Map.addLayer), задаются параметры отображения (min/max, подпись)

```
Map.addLayer(MAP, {min: 0, max: 3000}, 'Mean annual precipitation (mm/yr), 1991–2020');
```

**7** Экспорт. Экспортируется результат (например, GeoTIFF) в Google Drive: region, crs=EPSG:4326, scale, maxPixels

```
Export.image.toDrive({
image: MAP,
description: 'CHIRPS_MAP_1991_2020_mm_yr_CongoBasin',
region: roi,
crs: 'EPSG:4326',
scale: 5566,
maxPixels: 1e13
});
```

Выявлены контрасты между влажными экваториальными районами центральной части бассейна и более сухими периферийными областями, где повышается риск засухи и задержек начала сезона дождей. Полученная статистическая поверхность, содержащая информацию о среднегодовом количестве осадков в мм в каждой ячейке размером 5×5 км, представлена на рис. 3. Остальные тематические слои получены аналогичным способом и приводятся далее.

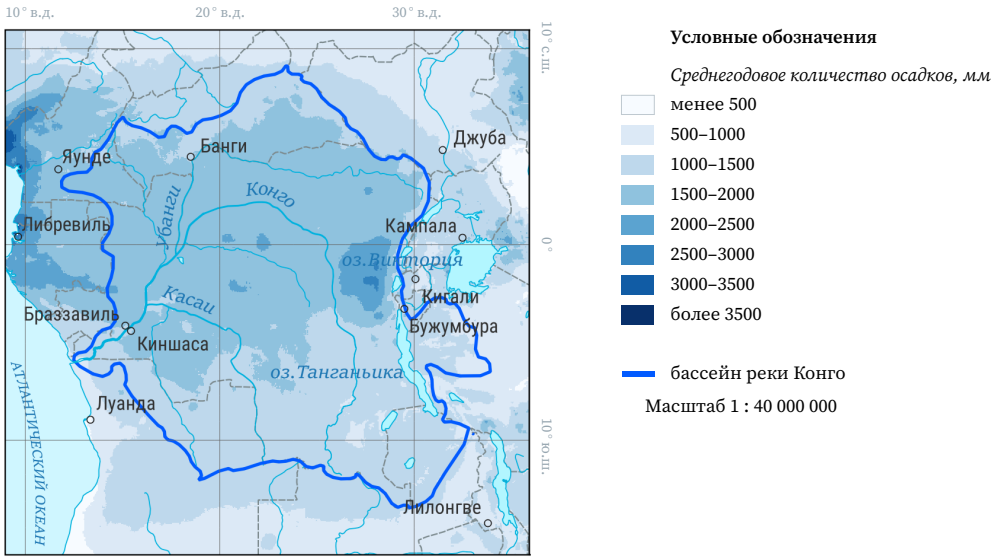



**Рис. 3**
Среднегодовое количество осадков в бассейне р. Конго (CHIRPS, 1991–2020 гг.)

**Fig. 3**
Mean annual precipitation in the Congo River basin (CHIRPS, 1991–2020)

Индекс сезонности осадков (индекс сезонности Уолша и Лоулера[5]; CHIRPS, среднее за 1991–2020 годы) (рис. 4) — безразмерный показатель, который отражает, насколько равномерно осадки распределены в течение года или, наоборот, насколько они сосредоточены в нескольких месяцах (чем выше значение, тем более выражен сезон дождей). Низкие значения (≈ 0–0,19) указывают на достаточно равномерные осадки в течение всего года; 0,20–0,39 — в целом равномерное распределение с более влажным сезоном; 0,40–0,59 — преимущественно сезонный режим с коротким сухим периодом; 0,60–0,79 — сезонный режим; 0,80–0,99 — сильно выраженная сезонность осадков с длительным сухим сезоном; значения ≥ 1,00 означают, что основная часть осадков выпадает примерно за три месяца или меньше, вплоть до экстремальной сезонности при значениях выше 1,20.

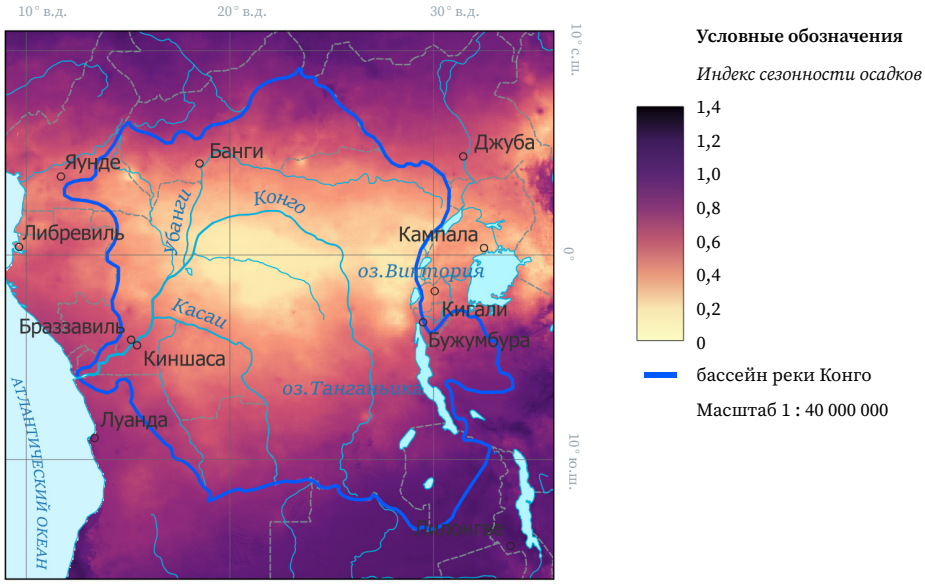



**Рис. 4**
Индекс сезонности осадков в бассейне р. Конго (индекс сезонности Уолша и Лоулера; CHIRPS, среднее за 1991–2020 гг.)

**Fig. 4**
Index rainfall seasonality in the Congo River basin (Seasonality Index of Walsh & Lawler; CHIRPS, 1991–2020)

5 Walsh R.P.D., Lawler D.M. Rainfall Seasonality: Description, Spatial Patterns and Change Through Time // Weather. 1981. Vol. 36. Iss. 7. P. 201–208.

Температурные характеристики (средние значения и показатели теплового стресса) получены по ERA5-Land с учетом высотной поправки при сопоставлении с WorldClim. Наиболее высокие среднегодовые значения температур (рис. 5) и число жарких дней в году (рис. 6) характерны для северных и южных окраин лесного массива, что согласуется с публикациями о снижении климатической пригодности для тропических лесов на периферии бассейна [3, 4]. Для оценки биофизического состояния растительности использованы нормализованный разностный вегетационный индекс (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) / улучшенный вегетационный индекс (*англ.* Enhanced Vegetation Index, EVI) (MODIS) (рис. 7) и производные показатели засушливости. Совмещение этих слоев позволяет выявлять территории, где климатические ограничения по влаге коррелируют с сезонным снижением продуктивности растительности и потенциальными рисками для агросистем. Для получения информации о засушливости использовались безоблачные снимки MODIS за 2001–2020 годы. Полученная поверхность в формате GeoTIFF с пространственным разрешением 10 км обрабатывается в геоинформационной системе (ГИС) QGIS. За основу классификации поверхности взята разработанная А.Р. Уэте и его соавторами шкала[6], указывающая на типы аридности (рис. 8).

**Рис. 5**
Средняя годовая температура в бассейне р. Конго за 1991–2020 гг.

**Fig. 5**
Mean air temperature in the Congo River basin, 1991–2020

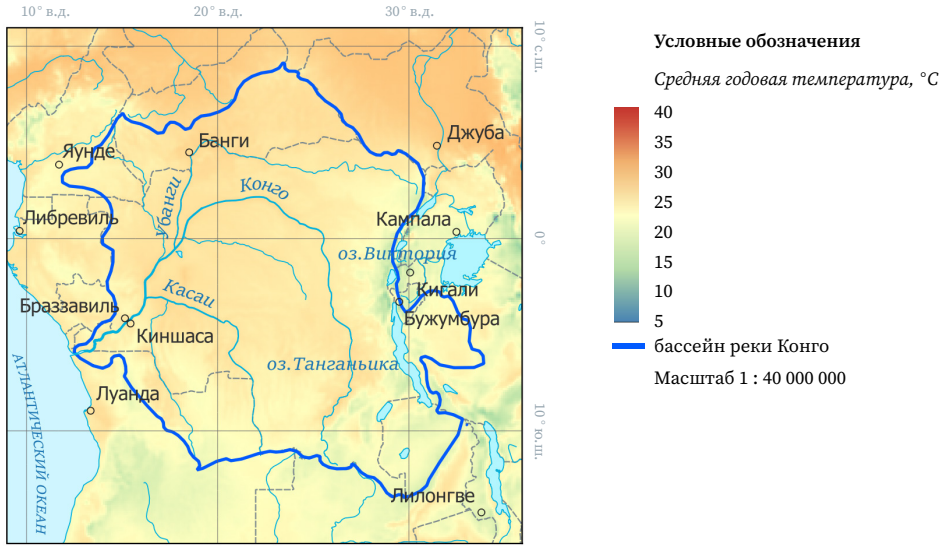
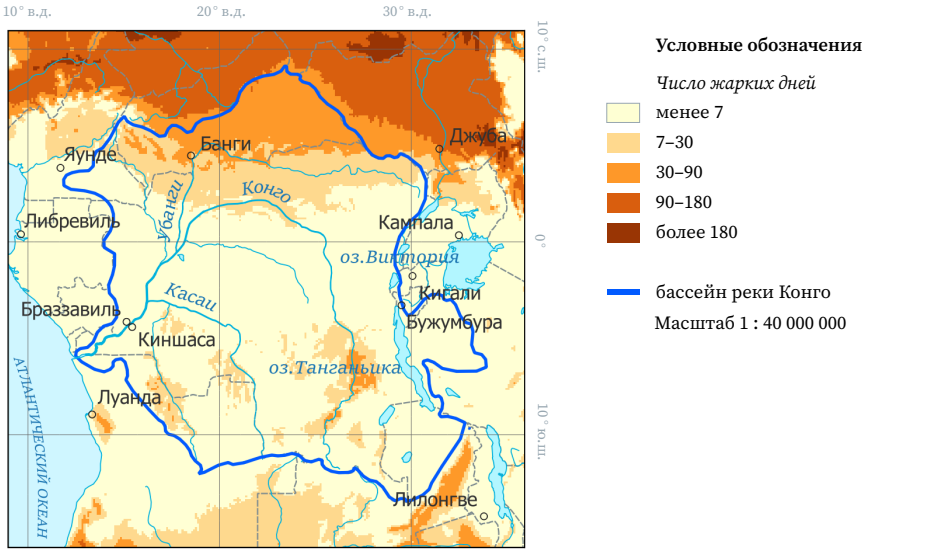



**Рис. 6**
Среднегодовое число жарких дней в бассейне р. Конго за 1991–2020 гг.

**Fig. 6**
Number of hot days in the Congo River basin, annual average for 1991–2020




6 Huete A., Didan K., Miura T., et al. Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the MODIS Vegetation Indices // Remote Sensing of Environment. 2002. Vol. 83. Iss. 1–2. P. 195–213.

**Рис. 7**
Растительный покров в бассейне р. Конго по NDVI за 1991–2020 гг.

**Fig. 7**
Vegetation cover in the Congo River basin on NDVI for 1991–2020

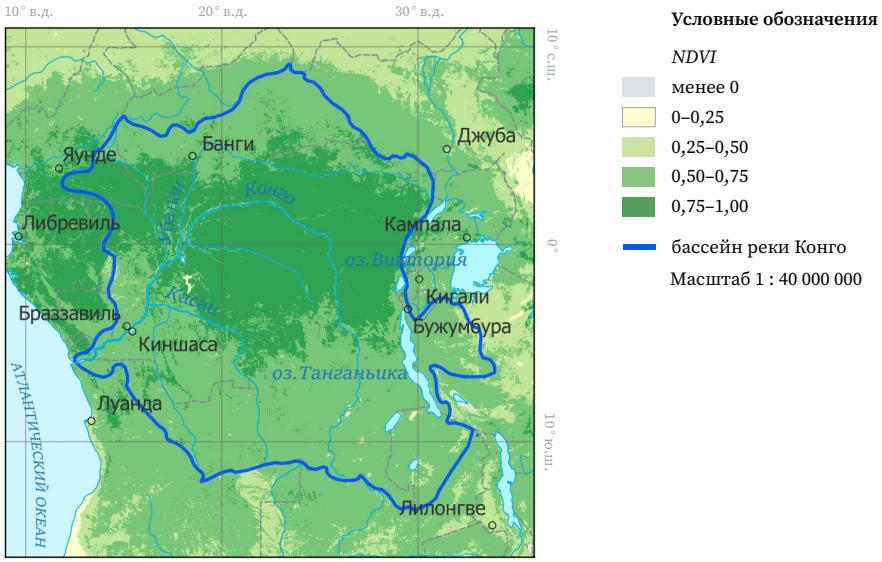
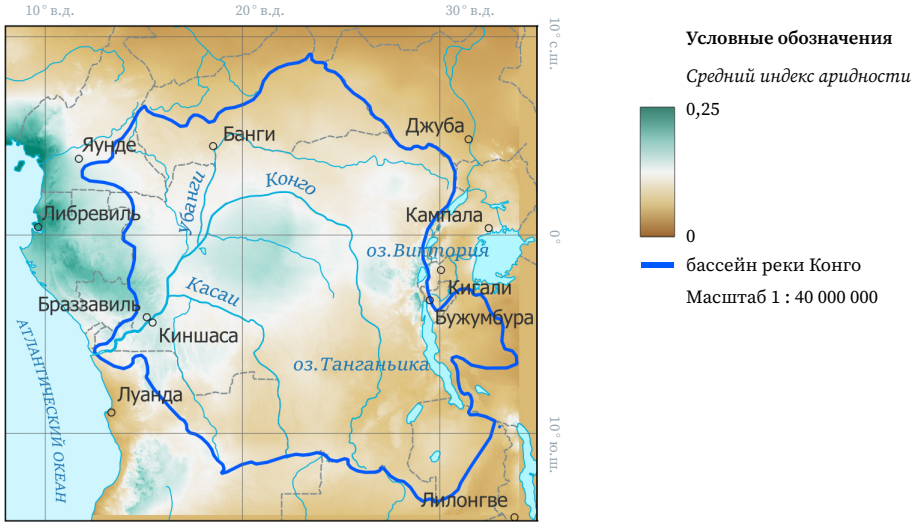



**Рис. 8**
Средний индекс аридности (P/PET) в бассейне р. Конго за 1991–2020 гг.

**Fig. 8**
Integrated aridity / wetness indicators (P/PET) in the Congo River basin for 1991–2020




Полученные тематические статистические поверхности требуют дополнительной обработки для нахождения площадей, занятых тем или иным типом поверхности. На рис. 9 представлена схема получения информации о площадях по типам (классам) поверхности / аридности.

В табл. 1 приводится информация о площадях, занятых типами поверхностями, рассчитанными по среднему значению NDVI за 1991–2020 годы в бассейне реки Конго. Из расчетов видно, что более половины бассейна реки Конго занимает густая растительность. Распределение площадей по типам аридности представлено в табл. 2.

**Рис. 9**
Схема получения статистических данных тематической поверхности

**Fig. 9**
The scheme of obtaining statistical data of a thematic surface

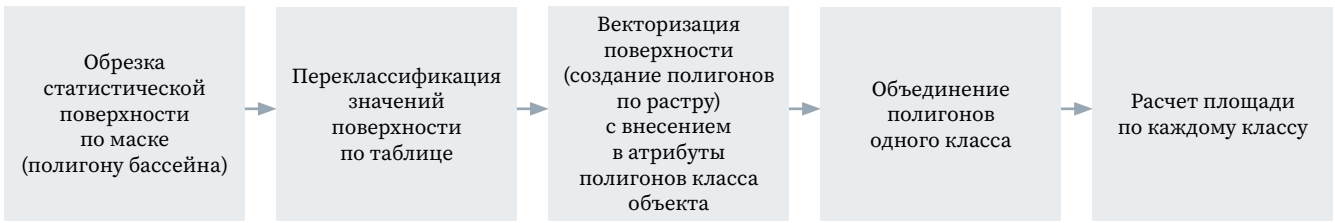


**Таблица 1**
Средний NDVI за 1991–2020 гг. в бассейне р. Конго

**Table 1**
Average NDVI for 1991–2020 in the Congo River basin

| Тип поверхности | Площадь, км² | Доля в общей площади бассейна, % |
|---|---|---|
| Водная поверхность | 6 661 | 0,18 |
| Открытая почва | 1 545 | 0,04 |
| Разреженная растительность | 111 824 | 3,03 |
| Плотная растительность | 1 552 321 | 42,08 |
| Густая растительность | 2 016 836 | 54,67 |

**Таблица 2**
Индекс аридности за 1991–2020 гг. в бассейне р. Конго

**Table 2**
Integrated aridity / wetness indicators for 1991–2020 in the Congo River basin

| Индекс аридности | Площадь, км² | Доля в общей площади бассейна, % |
|---|---|---|
| Гипераридный | 22 422 | 0,61 |
| Аридный | 3 666 220 | 99,37 |
| Полуаридный | 565 | 0,02 |
| Сухой субгумидный | 0 | 0,00 |
| Гумидный | 0 | 0,00 |

# 4 Обсуждение

Предложенные технологические схемы ориентированы на воспроизводимость и прозрачность, однако результаты определяются качеством исходной климатической информации и доступностью верификационных данных. Для бассейна реки Конго критичны ограниченность и неоднородность наземных наблюдений; систематические погрешности в данных по осадкам в горных областях и интенсивной конвекции; различия между реанализами и климатологическими поверхностями по температуре и влагосодержанию [1–4, 5, 6]. Следовательно, при использовании карт в приложениях необходимо сопровождать их оценкой неопределенности и проводить локальные уточнения при поступлении новых данных.

С практической точки зрения важным направлением является переход от карт средних климатических норм к картам экстремумов и событийных характеристик (продолжительность засушливых периодов, интенсивные осадки, тепловые волны), а также интеграция с картами землепользования и деградации лесов [13–15]. Это позволит лучше связать климатические риски с факторами антропогенного воздействия и адаптационными мерами.

# 5 Выводы

Перечислим результаты, достигнутые в ходе исследования.

1. Систематизированы ключевые проблемы климатического картографирования для сельского хозяйства бассейна реки Конго: дефицит наблюдений, неоднородность источников, сложности валидации.
2. Предложен многоисточниковый воспроизводимый ГИС-процесс, обеспечивающий гармонизацию климатических переменных к единому периоду и формирование набора агроклиматических индикаторов.
3. Создана серия карт (климатические типы, осадки и сезонность, температура и тепловой стресс, NDVI / засушливость), которая может служить базой для последующей оценки природных рисков и поддержки принятия решений.
4. Обозначены перспективы развития: переход к картографированию экстремумов, использование региональных климатических моделей и методов машинного обучения для уточнения локальных градиентов и неопределенности.

## библиография


1. Creese A., Washington R., Jones R. Climate Change in the Congo Basin: Processes Related to Wetting in the December – February Dry Season // Climate Dynamics. 2019. Vol. 53. P. 3583–3602. DOI:10.1007/s00382-019-04728-x.
2. Worden S., Fu R., Chakraborty S., et al. Where Does Moisture Come from over the Congo Basin? // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2021. Vol. 126. Iss. 8. P. e2020JG006024. DOI:10.1029/2020JG006024.
3. Cook K.H., Liu Y., Vizy E.K. Congo Basin Drying Associated with Poleward Shifts of the African Thermal Lows // Climate Dynamics. 2020. Vol. 54. P. 863–883. DOI:10.1007/s00382-019-05033-3.
4. Vizy E.K., Manoj H., Cook K.H. Is the Climate of the Congo Basin Becoming Less Able to Support a Tropical Forest Ecosystem? // Journal of Climate. 2023. Vol. 36. Iss. 23. P. 8171–8193. DOI:10.1175/JCLI-D-23-0275.1.
5. Funk C., Peterson P., Landsfeld M., et al. The Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations – A New Environmental Record for Monitoring Extremes // Scientific Data. 2015. Vol. 2. P. 150066. DOI:10.1038/sdata.2015.66.
6. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., et al. ERA5-Land: A State-of-the-Art Global Reanalysis Dataset for Land Applications // Earth System Science Data. 2021. Vol. 13. Iss. 9. P. 4349–4383. DOI:10.5194/essd-13-4349-2021.
7. Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: New 1-Km Spatial Resolution Climate Surfaces for Global Land Areas // International Journal of Climatology. 2017. Vol. 37. Iss. 12. P. 4302–4315. DOI:10.1002/joc.5086.
8. Beck H.E., Zimmermann N.E., McVicar T.R., et al. Present and Future Köppen-Geiger Climate Classification Maps at 1-km Resolution // Scientific Data. 2018. Vol. 5. P. 180214. DOI:10.1038/sdata.2018.214.
9. Hengl T., Mendes de Jesus J., Heuvelink G.B.M., et al. SoilGrids250m: Global Gridded Soil Information Based on Machine Learning // PLoS ONE. 2017. Vol. 12. Iss. 2. P. e0169748. DOI:10.1371/journal.pone.0169748.
10. Tatem A.J. WorldPop, Open Data for Spatial Demography // Scientific Data. 2017. Vol. 4. P. 170004. DOI:10.1038/sdata.2017.4.
11. Lehner B., Verdin K., Jarvis A. New Global Hydrography Derived from Spaceborne Elevation Data // Eos, Transactions, American Geophysical Union. 2008. Vol. 89. Iss. 10. P. 93–94. DOI:10.1029/2008EO100001.
12. Lehner B., Grill G. Global River Hydrography and Network Routing: Baseline Data and New Approaches to Study the World's Large River Systems // Hydrological Processes. 2013. Vol. 27. Iss. 15. P. 2171–2186. DOI:10.1002/hyp.9740.
13. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. Vol. 342. Iss. 6160. P. 850–853. DOI:10.1126/science.1244693.
14. Tyukavina A., Hansen M.C., Potapov P.V., et al. Congo Basin Forest Loss Dominated by Increasing Smallholder Clearing // Science Advances. 2018. Vol. 4. Iss. 11. P. eaat2993. DOI:10.1126/sciadv.aat2993.
15. Curtis P.G., Slay C.M., Harris N.L., et al. Classifying Drivers of Global Forest Loss // Science. 2018. Vol. 361. Iss. 6407. P. 1108–1111. DOI:10.1126/science.aau3445.
16. Malczewski J. GIS-based Multicriteria Decision Analysis: A Survey of the Literature // International Journal of Geographical Information Science. 2006. Vol. 20. Iss. 7. P. 703–726. DOI:10.1080/13658810600661508.
17. Saaty T.L. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process // International Journal of Services Sciences. 2008. Vol. 1. Iss. 1. P. 83–98. DOI:10.1504/IJSSCI.2008.017590.
18. Осипов А.Г., Дмитриев В.В., Ковязин В.Ф. Методика оценки и картографирования природно-аграрного потенциала ландшафтов // Геодезия и картография. 2021. № 9. С. 11–20. DOI:10.22389/0016-7126-2021-975-9-11-20.
19. Ковязин В.Ф., Данг Тхи Лан Ань, Данг Вьет Хунг. Разработка карт состояния земельных угодий национального парка Трам Чим (Вьетнам) по результатам мониторинга // Геодезия и картография. 2020. № 9. С. 53–64. DOI:10.22389/0016-7126-2020-963-9-53-64.
20. Головин П.Н., Богданов В.Л. Применение ГИС-технологий для оценки и повышения эффективности использования сельскохозяйственных земель в агроландшафтах на основе дистанционных и полевых данных // Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 1. С. 73–87. DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-1-73-87.

**авторы** **Гемджо Лионель**
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра картографии, картографический факультет
0009-0004-4766-9569

**Загребин Глеб Игоревич**
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра картографии, картографический факультет
канд. техн. наук
0000-0002-8313-5706

**Поступила 22.01.2026. Принята к публикации 20.02.2026. Опубликована 27.02.2026.**

UDC 528.94:551.58
DOI:10.30533/GiA-2026-005

CC BY

# Mapping Climatic Conditions for Agriculture in the Congo River Basin

**Lionel Guemdjo**[1] ✉, **Gleb I. Zagrebin**[1]

[1] Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
✉ lionelguemdjo@gmail.com

**citation** Guemdjo Lionel, Zagrebin GI. Mapping Climatic Conditions for Agriculture in the Congo River Basin. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying.* 2026;70(1): 77–90. DOI:10.30533/GiA-2026-005.

**keywords** agroclimatic zoning, Congo River Basin, climate risk, GIS mapping, remote sensing, reanalysis, precipitation, temperature

**abstract** This paper proposes a GIS-based framework for mapping climatic conditions relevant to agriculture in the Congo River Basin, where sparse in situ observations and strong convective variability complicate agroclimatic assessment. We discuss key challenges (data gaps, product inconsistencies, validation constraints and scale effects) and outline a multi-source workflow that harmonizes air temperature, precipitation and derived agroclimatic indicators to a common baseline (1991–2020). The approach combines satellite precipitation estimates, analysis products and high-resolution climatologies; uncertainty is quantified through inter-product comparison and cross-validation against available stations. Using Köppen-Geiger classes, aridity and rainfall seasonality metrics, we delineate major agroclimatic zones and identify hotspots of drought, excessive wetness and heat stress. The resulting map set, integrated with soils, terrain and settlement layers, provides an operational basis for climate-risk screening and subsequent natural-hazard mapping to support agricultural planning. Future work is linked to higher-frequency datasets, regional climate modeling and machine-learning downscaling to better represent local gradients and extremes.

**references**

1. Creese A, Washington R, Jones R. Climate Change in the Congo Basin: Processes Related to Wetting in the December – February Dry Season. *Climate Dynamics.* 2019;53: 3583–3602. DOI:10.1007/s00382-019-04728-x.
2. Worden S, Fu R, Chakraborty S, et al. Where Does Moisture Come from over the Congo Basin? *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences.* 2021;126(8): e2020JG006024. DOI:10.1029/2020JG006024.

3. Cook KH, Liu Y, Vizy EK. Congo Basin Drying Associated with Poleward Shifts of the African Thermal Lows. ***Climate Dynamics.*** 2020;54: 863–883. DOI:10.1007/s00382-019-05033-3.
4. Vizy EK, Manoj H, Cook KH. Is the Climate of the Congo Basin Becoming Less Able to Support a Tropical Forest Ecosystem? ***Journal of Climate.*** 2023;36(23): 8171–8193. DOI:10.1175/JCLI-D-23-0275.1.
5. Funk C, Peterson P, Landsfeld M, et al. The Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations – A New Environmental Record for Monitoring Extremes. ***Scientific Data.*** 2015;2: 150066. DOI:10.1038/sdata.2015.66.
6. Muñoz-Sabater J, Dutra E, Agustí-Panareda A, et al. ERA5-Land: A State-of-the-Art Global Reanalysis Dataset for Land Applications. ***Earth System Science Data.*** 2021;13(9): 4349–4383. DOI:10.5194/essd-13-4349-2021.
7. Fick SE, Hijmans RJ. WorldClim 2: New 1-Km Spatial Resolution Climate Surfaces for Global Land Areas. ***International Journal of Climatology.*** 2017;37(12): 4302–4315. DOI:10.1002/joc.5086.
8. Beck HE, Zimmermann NE, McVicar TR, et al. Present and Future Köppen-Geiger Climate Classification Maps at 1-km Resolution. ***Scientific Data.*** 2018;5: 180214. DOI:10.1038/sdata.2018.214.
9. Hengl T, Mendes de Jesus J, Heuvelink GBM, et al. SoilGrids250m: Global Gridded Soil Information Based on Machine Learning. ***PLoS One.*** 2017;12(2): e0169748. DOI:10.1371/journal.pone.0169748.
10. Tatem AJ. WorldPop, Open Data for Spatial Demography. ***Scientific Data.*** 2017;4: 170004. DOI:10.1038/sdata.2017.4.
11. Lehner B, Verdin K, Jarvis A. New Global Hydrography Derived from Spaceborne Elevation Data. ***Eos, Transactions, American Geophysical Union.*** 2008;89(10): 93–94. DOI:10.1029/2008EO100001.
12. Lehner B, Grill G. Global River Hydrography and Network Routing: Baseline Data and New Approaches to Study the World's Large River Systems. ***Hydrological Processes.*** 2013;27(15): 2171–2186. DOI:10.1002/hyp.9740.
13. Hansen MC, Potapov PV, Moore R, et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. ***Science.*** 2013;342(6160): 850–853. DOI:10.1126/science.1244693.
14. Tyukavina A, Hansen MC, Potapov PV, et al. Congo Basin Forest Loss Dominated by Increasing Smallholder Clearing. ***Science Advances.*** 2018;4(11): eaat2993. DOI:10.1126/sciadv.aat2993.
15. Curtis PG, Slay CM, Harris NL, et al. Classifying Drivers of Global Forest Loss. ***Science.*** 2018;361(6407): 1108–1111. DOI:10.1126/science.aau3445.
16. Malczewski J. GIS-Based Multicriteria Decision Analysis: A Survey of the Literature. ***International Journal of Geographical Information Science.*** 2006;20(7): 703–726. DOI:10.1080/13658810600661508.
17. Saaty TL. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. ***International Journal of Services Sciences.*** 2008;1(1): 83–98. DOI:10.1504/IJSSCI.2008.017590.
18. Osipov AG, Dmitriev VV, Kovyazin VF. Metodika otsenki i kartografirovaniya prirodno-agrarnogo potentsiala landshaftov [Methods of Assessing and Mapping the Natural and Agricultural Potential of Landscapes]. ***Geodesy and Cartography.*** 2021;9: 11–20. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2021-975-9-11-20.
19. Kovyazin VF, Dang Thi Lan Anh, Dang Viet Hung. Razrabotka kart sostoyaniya zemel'nykh ugodiy natsional'nogo parka Tram Chim (V'etnam) po rezul'tatam monitoringa [Developing Land-State Maps of Tram Chim National Park in Vietnam Based on Monitoring Results]. ***Geodesy and Cartography.*** 2020;9: 53–64. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2020-963-9-53-64.
20. Golovin PN, Bogdanov VL. Primenenie GIS-tekhnologiy dlya otsenki i povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya sel'skokhozyaystvennykh zemel' v agrolandshaftakh na osnove distantsionnykh i polevykh dannykh [Application of GIS Technologies to Assess and Improve the Efficiency of Agricultural Land Use in Agro-Landscapes Based on Remote and Field Data]. ***Vestnik SSUGT.*** 2024;29(1): 73–87. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-1-73-87.

authors

**Lionel Guemdjo**
Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Cartography, Faculty of Cartography
0009-0004-4766-9569

**Gleb I. Zagrebin**
Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Cartography, Faculty of Cartography
PhD in Engineering
0000-0002-8313-5706

Submitted: January 22, 2026. Accepted: February 20, 2026. Published: February 27, 2026.

УДК 528.91:528.94:550.8
DOI:10.30533/GiA-2026-006

CC BY

# От картографического обеспечения к геоинформационным сервисам управления недропользованием: мировые практики, российские ограничения и экономические эффекты

**Н.Р. Камынина**[1] ✉, **Д.С. Логинов**[1]

[1] Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия
✉ rector@miigaik.ru

**цитирование** Камынина Н.Р., Логинов Д.С. От картографического обеспечения к геоинформационным сервисам управления недропользованием: мировые практики, российские ограничения и экономические эффекты // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 1. С. 91–109. DOI:10.30533/GiA-2026-006.

**ключевые слова** недропользование, картографическое обеспечение, геоинформационный сервис, пространственные данные, геолого-геофизические данные, цифровой двойник, управленческо-экономический эффект, цифровая трансформация

**аннотация** В данной статье представлено обоснование перехода от картографического обеспечения недропользования к геоинформационным сервисам управления с позиций управленческого цикла недропользования как капиталоемкой и территориально распределенной сферы хозяйственной деятельности. С опорой на положения о цифровизации картографического обеспечения и на основе анализа зарубежных научных и отраслевых источников выделены документированные проблемные зоны управленческого цикла недропользования: трудоемкий доступ к геонаучным данным, недостаточная прослеживаемость геолого-геофизической информации, накопление геологической и ресурсной неопределенности, перенос ресурсной неопределенности в финансово-экономическую оценку, разрыв между планированием, исполнением и отчетностью, а также недостаточная зрелость платформенной интеграции и цифровых двойников. Отмечена роль геоинформационных решений как инструментов устранения выделенных проблемных зон. Систематизированы классы зарубежных и отечественных геоинформационных решений, показана их функциональная роль в устранении указанных проблемных зон. Сформирована технологическая карта отечественных решений, и предложена целевая модель перехода к сквозному сервисному контуру геоинформационного управления недропользованием, который представлен двумя самостоятельными уровнями

государственных данных и прикладных отраслевых решений, обеспечивающих геоинформационную поддержку работы с горно-геологическими данными, повышение надежности информации, уменьшение инвестиционных рисков и рост повторного использования накопленных данных.

# 1 Введение

Недропользование относится к числу капиталоемких и территориально распределенных сфер хозяйственной деятельности, в которых качество управленческих и производственно-технологических решений в значительной степени зависит от полноты, сопоставимости и доступности пространственных, геологических и геофизических данных. Выбор участков геолого-разведочных работ, планирование полевых и камеральных этапов, оценка инфраструктурной доступности, контроль выполнения работ, анализ архивной изученности территории и последующее принятие решений по освоению недр предполагают постоянное обращение к пространственно привязанной информации. В этих условиях ограниченная доступность данных, несогласованность форматов, дублирование материалов, разрыв между архивами, геоинформационными проектами и управленческой аналитикой повышают трудоемкость подготовки решений и усиливают пространственно обусловленную неопределенность недропользовательских процессов.

Традиционно работа с пространственными данными в недропользовании рассматривалась преимущественно в логике картографического обеспечения, ориентированного на подготовку картографических материалов, тематических карт и иных результатов картографического производства. Однако развитие цифровых картографических и геоинформационных продуктов, веб-картографии, геосервисов, трехмерного (3D) моделирования, облачных платформ и инструментов пространственной аналитики существенно изменило состав результатов, технологическую логику и управленческое значение таких решений. В современных условиях карта перестает быть единственным или конечным результатом работы с пространственными данными, наряду с этим все большее значение приобретают геоинформационные проекты, базы пространственных данных, веб-картографические сервисы, цифровые модели и платформенные решения, обеспечивающие не только визуализацию, но и поиск, сопоставление, анализ, передачу и контроль использования пространственной информации.

Современные цифровые картографические и геоинформационные продукты вступают в противоречие с прежними методологическими принципами, в рамках которых картографическое обеспечение рассматривалось преимущественно с позиций подготовки карт и атласов [1]. Важным для настоящей статьи является и то, что недропользование понимается как стратегическая сфера научно-технической деятельности с высоким потенциалом использования пространственных данных, а модернизация картографического обеспечения связывается с созданием единого геоинформационного пространства, разработкой баз пространственных данных, геоинформационных проектов, веб-сервисов и цифровых картографических продуктов для сопровождения геолого-разведочных работ.

Вместе с тем в существующих исследованиях и отраслевых материалах переход к цифровым картографическим и геоинформационным продуктам чаще раскрывается через технологическую эволюцию инструментов: развитие геоинформационных систем (ГИС), веб-картографии, баз пространственных данных, 3D-моделирования и специализированного геонаучного программного обеспечения [2, 3]. Менее разработанным остается управленческо-экономический аспект данного перехода: какие именно потери, задержки и риски отраслевого цикла сокращаются при переходе от картографического продукта к сервисной модели работы с пространственными и геолого-геофизическими данными.

В рамках настоящей статьи данный разрыв рассматривается через параметры управленческого цикла недропользования: сроки доступа к геолого-геофизической

информации; трудоемкость обработки и сопоставления данных; риск дублирования исследований; прослеживаемость полевых и камеральных этапов; качество проектных решений; издержки, возникающие вследствие неполной или несогласованной пространственной информации при выборе территорий, маршрутов, объектов работ и сценариев дальнейшего освоения недр.

Целью статьи является обоснование перехода от картографического обеспечения недропользования к геоинформационным и веб-картографическим сервисам управления, а также определение на основе анализа зарубежных и российских практик работы с пространственными и геолого-геофизическими данными управленческо-экономических эффектов такого перехода.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- раскрыть методологическую основу перехода от картографического обеспечения к геоинформационным сервисам управления;
- систематизировать глобальные технологические тренды развития геоинформационных, веб-картографических и геонаучных платформ в недропользовании;
- выделить документированные проблемные зоны управленческого цикла при работе с пространственными и геолого-геофизическими данными;
- соотнести указанные проблемные зоны с классами зарубежных и отечественных технологических решений;
- сформировать технологическую карту отечественных решений и определить ограничения их интеграции в сквозной сервисный контур управления недропользованием.

Научная новизна статьи заключается в развитии положений о картографическом обеспечении недропользования в управленческо-экономической плоскости. В отличие от подходов, ограничивающихся техническим описанием ГИС, веб-картографических решений и цифровых картографических продуктов, в данном исследовании предлагается рассматривать геоинформационные сервисы через их влияние на параметры подготовки и реализации недропользовательских решений: трудоемкость работы с геолого-геофизическими данными; скорость доступа к пространственной информации; снижение дублирования исследований; контролируемость полевых и камеральных этапов; снижение пространственно обусловленной неопределенности и повышение обоснованности решений по изучению и освоению недр.

## 2 Материалы и методы

В основу исследования положена теоретико-методологическая основа перехода от картографического обеспечения к геоинформационным сервисам управления недропользованием. Методологическая постановка вопроса о переходе от картографического обеспечения к геоинформационным сервисам управления недропользованием требует предварительного разграничения трех исследовательских уровней:

1) картографического обеспечения как специальной области создания и использования картографических материалов, цифровых картографических продуктов и геоинформационных моделей;
2) технологической организации работ с пространственными и геолого-геофизическими данными (ГИС-проекты, базы пространственных данных, веб-картографические сервисы, инструменты пространственного анализа, цифровые модели и специализированные программные комплексы);
3) управленческо-экономического характера (каким образом указанные подходы изменяют параметры подготовки, реализации недропользовательских решений и контроля над ними).

По нашему мнению, картографическое обеспечение научно-технической деятельности должно рассматриваться не как простой набор картографических результатов, а как система, включающая цифровые картографические

и геоинформационные продукты, пространственные данные, методы картографии и геоинформатики, технические средства и процедуры их применения в прикладных задачах. Это позволяет выйти за пределы традиционного понимания картографического обеспечения как подготовки карт, атласов или тематических материалов. Продолжение прямого использования традиционного принципа без адаптации к современному многообразию результатов картографического обеспечения усложняет решение выявленной научной проблемы, а сохранение прежнего подхода может привести лишь к смене названия без изменения содержания и к консервации несоответствия современным требованиям [1].

Переход от картографического обеспечения к геоинформационным сервисам управления не следует понимать как отказ от картографической методологии. Напротив, речь идет о расширении ее прикладного контура. Картографическое обеспечение сохраняет значение как способ пространственной организации, анализа и визуализации данных, однако в цифровой среде оно все чаще реализуется через сервисные и платформенные формы. Это принципиально важно для недропользования, поскольку геолого-разведочные и недропользовательские процессы зависят не только от итогового картографического материала, но и от того, насколько быстро и полно участники проекта получают доступ к исходным, промежуточным и итоговым пространственным данным.

Это положение имеет прямое управленческо-экономическое значение. Если ГИС-проект выполняет функции рабочего пространства, хранилища данных, формы доступа и средства подготовки новых продуктов, то он влияет не только на технологию картографического производства, но и на организацию отраслевого управленческого цикла. В частности, изменяются условия поиска и повторного использования геолого-геофизических данных, сопоставления материалов разных этапов работ, контроля актуальности пространственной информации, передачи данных между исполнителями, подрядчиками, заказчиками и отраслевыми специалистами. Следовательно, предметом анализа становятся не только состав и качество геоинформационного продукта, но и его влияние на трудоемкость, сроки, риск дублирования работ и прослеживаемость решений.

В недропользовании это особенно существенно из-за многоэтапности и высокой стоимости геолого-разведочных работ. Пространственные данные применяются при проектировании сети наблюдений, выполнении полевых работ, обработке и интерпретации результатов, подготовке отчетных материалов, оценке перспектив территории, формировании цифровых моделей и принятии последующих решений по освоению недр. Единое геоинформационное пространство может использоваться, в частности, для верификации положения проектной сети геофизических наблюдений, уточнения данных о геологическом строении, автоматизации процессов цифрового картографического производства геофизических карт и подготовки рекомендаций по проектированию новых сетей наблюдений. С управленческой точки зрения это позволяет рассматривать геоинформационные сервисы не как вспомогательную визуализацию, а как инструмент снижения пространственно обусловленной неопределенности в недропользовательских решениях.

Такая неопределенность возникает в случаях, когда данные о территории, геологическом строении, инфраструктуре, ранее выполненных исследованиях, проектных сетях наблюдений и результатах интерпретации разрознены, труднодоступны или представлены в несопоставимых форматах. В этих условиях ошибки выбора территории, маршрута, сети наблюдений, состава работ или проектного решения могут приводить к дополнительным затратам, повторным исследованиям, увеличению сроков и снижению качества последующих решений.

Следовательно, с точки зрения управленческо-экономического контура цифровые картографические и геоинформационные продукты в недропользовании необходимо оценивать не только по их соответствию картографическим и технологическим требованиям, но и по их способности изменять параметры отраслевого процесса. К таким параметрам относятся время доступа к данным, объем ручной обработки и сопоставления материалов, доля повторно

используемых данных, количество дублирующих операций, скорость подготовки аналитических материалов, качество контроля полевых и камеральных этапов, а также возможность последующего аудита принятых решений.

Результаты анализа мировой практики по данному направлению показывают, что развитие геоинформационных сервисов в недропользовании уже вышло за пределы классического картографирования. Крупнейшие технологические компании предлагают решения для пространственной аналитики, геологического и геофизического моделирования, управления данными, операционного контроля, планирования добычных и разведочных процессов, интеграции отраслевых рабочих процессов и снижения неопределенности при принятии решений. Так, ГИС-платформы используются в течение всего жизненного цикла геологоразведки и последующего восстановления территорий; специализированное геонаучное программное обеспечение применяется для 3D-моделирования, интерпретации геологических данных и оценки ресурсов; цифровые платформы для управления данными разведки и добычи полезных ископаемых (также upstream-платформы, *англ.* upstream — «связанный с разведкой и добычей полезных ископаемых») [4] объединяют информацию, приложения и команды в единой среде совместной работы[1,2,3]. Эти процессы отражают более общий переход от локального использования картографических материалов к платформенной организации пространственных данных в недропользовании.

В России данное направление также приобретает институциональное значение. Развитие Национальной системы пространственных данных (НСПД), цифровизация геологической информации, деятельность Росгеолфонда, формирование государственных информационных ресурсов о недрах и развитие отечественных ГИС-решений создают предпосылки для перехода к более целостной модели работы с пространственными и геолого-геофизическими данными [5, 6]. При этом сохраняются ограничения, связанные с фрагментацией данных, неоднородностью их качества и форматов, недостаточной интеграцией архивных, производственных и управленческих контуров, а также необходимостью оценки экономической результативности внедряемых цифровых решений.

Таким образом, переход от картографического обеспечения к геоинформационным сервисам управления недропользованием может быть представлен как методологическое расширение исходной категории. На уровне картографии и геоинформатики он выражается в развитии цифровых картографических продуктов, ГИС-проектов, баз пространственных данных, веб-сервисов и моделей. На уровне организации недропользовательских процессов он проявляется в создании единой среды доступа к геолого-геофизической информации, ее анализа, передачи и повторного использования. На уровне управленческо-экономического анализа он раскрывается через влияние этих решений на трудоемкость, сроки, риски, дублирование работ и качество решений по изучению и освоению недр. Указанный переход обобщен в табл. 1, на основе которой можно сделать следующий вывод: картографическое обеспечение задает методологическую основу работы с пространственными данными, геоинформационные сервисы развивают эту основу в направлении цифровой организации отраслевых процессов, а пространственные данные становятся фактором снижения неопределенности и издержек недропользовательских решений.

1 GIS in Mining: Application of GIS in Mineral Exploration / Esri. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.esri.com/en-us/industries/mining/overview (дата обращения: 17.01.2026).

2 Mining & Mineral Exploration, Permitting & Land-Use Planning / Esri. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.esri.com/en-us/industries/mining/segments/exploration (дата обращения: 17.01.2026).

3 Seequent. Mining Geoscience Software Solutions. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.esri.com/en-us/industries/earth-sciences/disciplines/geoscience (дата обращения: 17.01.2026).

**Таблица 1**
Переход от картографического обеспечения к геоинформационным сервисам управления недропользованием

**Table 1**
Transition from cartographic support to geoinformation services for subsoil use management

| Критерий | Картографическое обеспечение | Геоинформационные сервисы управления | Управленческо-экономический смысл |
|---|---|---|---|
| **Основной результат** | Карты, цифровые карты, картографические материалы | ГИС-проекты, базы пространственных данных, веб-сервисы, цифровые модели | Результат оценивается не только по качеству представления данных, но и по влиянию на процесс подготовки решений |
| **Функция** | Визуализация и систематизация пространственной информации | Поиск, интеграция, анализ, передача и актуализация данных | Сокращение времени доступа к данным и снижение трудоемкости их сопоставления |
| **Технологическая основа** | Цифровое картографическое производство и ГИС-инструменты | Единое геоинформационное пространство, веб-картография, специализированные программные комплексы | Формирование общей среды работы заказчика, подрядчика и отраслевых специалистов |
| **Масштаб применения** | Обеспечение отдельных этапов геолого-геофизических исследований | Сопровождение полного цикла: от исходных данных до контроля и повторного использования результатов | Снижение дублирования работ и повышение прослеживаемости решений |
| **Результативность** | Полнота, точность, содержательность и пригодность картографического продукта | Доступность, актуальность, сопоставимость, скорость обработки и повторное использование данных | Оценка эффекта через сроки, трудозатраты, риски, ошибки и качество решений |

# 3 Результаты и обсуждение

## 3.1 Анализ глобальных технологических трендов развития геоинформационных сервисов в недропользовании

Анализируя глобальные технологические тренды, целесообразно представлять их не как перечень новых программных инструментов, а как последовательное расширение функции пространственных данных в недропользовании. В этой логике пространственные данные проходят несколько уровней использования: от картографической визуализации к пространственной аналитике, от аналитики к геологическому 3D-моделированию, от моделирования к ресурсной и проектной оценке, от проектной оценки к операционному контролю, а далее — к платформенной интеграции данных, моделей и участников проекта. Такой подход позволяет связать технологические тренды не с общей риторикой цифровизации, а с конкретными изменениями в управленческом цикле недропользования. По данным компании Grand View Research, мировой рынок геопространственной аналитики оценивался в 102,67 млрд долл. США в 2025 году и, по прогнозу агентства, может достигнуть 234,01 млрд долл. США к 2033 году при среднегодовом темпе роста 10,4 % [7]. Организация Mordor Intelligence дает близкую оценку: 93,52 млрд долл. США в 2025 году, 108,03 млрд долл. США в 2026 году и 196,59 млрд долл. США к 2031 году при среднегодовом темпе роста 12,72 %[4].

Выделенные ниже тренды рассматриваются как взаимосвязанные направления трансформации работы с пространственными и геолого-геофизическими

4 Morley C., Snowden D.V., Day D. Financial Impact of Resource/Reserve Uncertainty // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 1999. Vol. 99. Iss. 6. P. 293–301.

данными. Их общая логика состоит в том, что геоинформационные решения постепенно выходят за пределы картографического отображения и начинают выполнять функции аналитической, модельной, операционной и платформенной поддержки решений.

**1. Переход от картографической визуализации к пространственной аналитике жизненного цикла недропользования**
В современных практиках добычи и георазведки ГИС используется не только для построения карт, но и для сопоставления геологических, инфраструктурных, экологических, кадастровых, транспортных и производственных данных. В результате пространственная информация включается в процессы планирования разведочных работ, оценки доступности территорий, анализа ограничений, мониторинга выполнения операций и последующей рекультивации [8]. Другими словами, в управленческо-экономическом локусе это означает, что геоинформационные решения все больше начинают влиять на качество решений не на одном отдельном этапе, а на протяжении всего цикла подготовки, реализации и контроля работ[5].

**2. Интеграция ГИС с геологическим и геофизическим моделированием**
Для недропользования принципиально важно не только определить положение объекта на карте, но и построить представление о его подповерхностной структуре, ресурсном потенциале, неопределенности данных и возможных сценариях дальнейшего изучения, поэтому в мировой практике возрастает значение специализированного геонаучного программного обеспечения, ориентированного на 3D-моделирование, интерпретацию геологических данных, оценку ресурсов и совместную работу специалистов разных профилей [9]. Такой переход меняет функциональное назначение геоинформационных решений, они становятся не только средством пространственного отображения, но и инструментом проверки гипотез о строении недр, сопоставления интерпретаций и подготовки более обоснованных решений по дальнейшим работам.

**3. Развитие платформенной организации данных**
Крупные поставщики цифровых решений для нефтегазового и горнодобывающего сектора все чаще предлагают не отдельные программные продукты, а платформы, объединяющие данные, приложения, модели, вычислительные ресурсы и команды специалистов. Такая архитектура отвечает характеру недропользовательских процессов, в которых результаты полевых работ, архивные материалы, геологические модели, экономические оценки и проектные решения должны быть доступны разным участникам в согласованной цифровой среде. Экономическое значение платформенного подхода проявляется в сокращении времени на поиск и согласование данных, снижении потерь информации при передаче между этапами работ и повышении воспроизводимости аналитических процедур.

**4. Переход от геоинформационного анализа к операционному контролю**
В горнодобывающей промышленности цифровые решения все чаще связывают пространственные данные с данными о технике, персонале, производительности, безопасности, состоянии инфраструктуры и ходе выполнения работ. Это позволяет использовать геопространственные данные не только при проектировании или анализе территории, но и при текущем управлении производственными процессами [10]. Для недропользования это особенно важно, поскольку полевые и производственные операции имеют выраженную пространственную структуру, связаны с перемещением техники и персонала, зависят от природных, инфраструктурных и технологических ограничений.

5 Delfi Digital Platform / SLB. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.slb.com/products-and-services/delivering-digital-at-scale/software/delfi (дата обращения: 17.01.2026).

**5. Применение искусственного интеллекта, машинного обучения и облачных вычислений при работе с пространственными, геологическими и геофизическими данными**

В этой области искусственный интеллект не заменяет геолога, геофизика или картографа, а используется для повышения скорости обработки данных, выявления закономерностей, классификации объектов, анализа изображений, интерпретации больших массивов наблюдений и поддержки сценарной оценки. В управленческо-экономическом аспекте значение таких решений состоит не в самом факте применения искусственного интеллекта, а в возможности сокращения времени аналитического цикла, уменьшения трудоемкости рутинных операций и повышения качества предварительной оценки территорий или объектов.

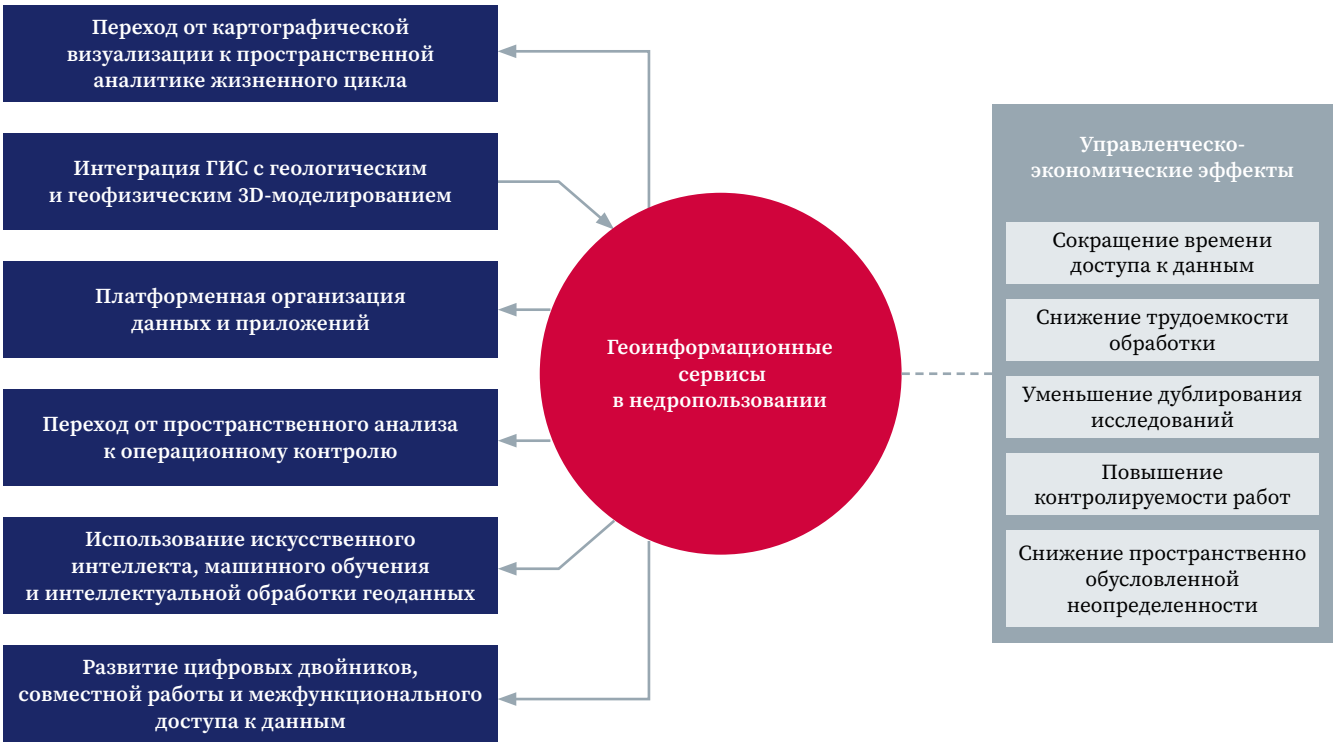
**6. Повышение роли совместной работы и межфункционального доступа к данным**

Недропользовательские проекты предполагают участие геологов, геофизиков, картографов, инженеров, проектировщиков, экономистов, подрядных организаций, заказчиков и регуляторов. При разобщенности данных каждый участник работает с собственной версией информации, что увеличивает риск несогласованности решений, повторной подготовки материалов и ошибок при передаче данных. Геоинформационные сервисы, веб-платформы и облачные среды позволяют снизить остроту этой проблемы за счет общего доступа к актуальным наборам данных, картографическим слоям, моделям и результатам анализа.

Глобальные тренды показывают не простое расширение набора цифровых инструментов, а изменение роли пространственных данных в недропользовании. На первом уровне они обеспечивают визуализацию и пространственную консолидацию информации, на втором становятся основой 3D-моделирования и ресурсной интерпретации, на третьем включаются в планирование и операционный контроль, на четвертом формируют платформенную среду совместной работы и повторного использования данных. Именно эта логика позволяет далее перейти от анализа технологических трендов к выделению проблемных зон управленческого цикла, которые с помощью данных решений можно устранять [11, 12]. На рис. 1 схематично представлены описанные выше тренды и их эффекты.

**Рис. 1**
Схема технологических трендов и управленческо-экономических эффектов

**Fig. 1**
Scheme of technological trends and managerial and economic effects



## 3.2 Проблемные зоны управленческого цикла недропользования при работе с пространственными и геолого-геофизическими данными

В рамках данного исследования целесообразно выделить такие проблемные зоны управленческого цикла, как трудоемкость обработки данных; неопределенность интерпретации; риск дублирования работ и потери качества проектно-инвестиционных оценок; устойчивые нарушения связности данных моделей, процедур анализа и контуров принятия решений, которые увеличивают сроки подготовки решений, и др.

Первая проблемная зона проявляется в том, что накопление геонаучных данных опережает зрелость механизмов управления ими. В частности, данная проблема подтверждается результатами отраслевого исследования компании Seequent, основанного на 709 ответах представителей 320 организаций из 91 страны. Согласно данному отчету[6], 83 % респондентов рассматривают управление геонаучными данными как критически важную проблему для организации, более 80 % организаций относят ее к числу пяти наиболее значимых вопросов, однако менее трети используют сформированный фреймворк управления данными. При этом 35 % специалистов тратят более 30 % рабочего времени на задачи управления данными, только 1 из 10 оценивает доступ к данным в организации как крайне простой, а 40 % респондентов называют контроль версий главным вызовом при совместной работе с активными проектными данными. Следовательно, исходным ограничением является не дефицит данных сам по себе, а высокая организационная стоимость приведения их в состояние, пригодное для анализа, интерпретации и повторного использования.

Вторая проблемная зона связана с ограниченной видимостью, прослеживаемостью и надежностью геолого-геофизических данных (G&G-данные — комплексная геологическая и геофизическая информация, используемая в нефтегазовой отрасли, горном деле и инженерных изысканиях) в upstream-процессах. В отчете IDC / S&P Global[7] показано, что геологи и геофизики работают с данными, поступающими от разных поставщиков и внутренних источников, а недостаточная зрелость процессов загрузки, валидации и передачи данных приводит к проблемам полноты и точности. В исследовании зафиксировано, что 60 % upstream-организаций не имеют эффективных возможностей обмена данными между релевантными подразделениями и командами; 40 % пользователей лишь в слабой или умеренной степени уверены в полноте и надежности используемых G&G-данных; 58 % пользователей жалуются на отсутствие видимости происхождения данных (или только частичную видимость). Иными словами, в недропользовании качество решения зависит не только от наличия геолого-геофизических материалов, но и от возможности установить их происхождение, полноту, актуальность и пригодность для конкретной аналитической задачи.

Третья проблемная зона возникает на уровне геологической интерпретации и минерально-ресурсной оценки. В обзорном исследовании О.Т. Линди (O.T. Lindi) и его соавторов деятельность по оценке минеральных ресурсов рассматривается как совокупность взаимосвязанных этапов, на каждом из которых неопределенность может возникать, накапливаться и передаваться в последующие расчеты. Авторы сформировали базу анализа по 87 источникам за 1991–2024 годы и систематизировали методы количественной оценки неопределенности в минерально-ресурсной оценке [13]. Это позволяет рассматривать

6 Geoscience Data Management Report – 2021 and Beyond / Seequent. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.seequent.com/community/research-reports/geoscience-data-management-report-2021/ (дата обращения: 17.01.2026).

7 Verma G. Exploring the Geoscience Data Management Landscape / IDC, S&P Global Commodity Insights, 2023. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.spglobal.com/content/dam/spglobal/mi/en/documents/secure/Exploring-the-Geoscience-Data-Management-Landscape.pdf (дата обращения: 17.01.2026).

геологическое и ресурсное моделирование не как технический этап обработки данных, а как узел передачи неопределенности от исходных наблюдений к последующим проектным и инвестиционным решениям.

Четвертая проблемная зона состоит в трансляции геологической и ресурсной неопределенности в финансовую оценку проекта. К. Морли (C. Morley) с соавторами[8] показал, что при построении финансовой модели горного проекта значительное внимание обычно уделяется капитальным и операционным затратам, ценовым прогнозам и ставкам дисконтирования, тогда как неопределенность базового входа, т. е. оценки ресурсов и запасов, часто недооценивается. Авторы выделяют четыре процесса, влияющих на ресурсно-резервную неопределенность: определение промышленных руд, геологическую интерпретацию, оценку ресурсов, оценку запасов руды и планирование горных работ. По результатам моделирования исследователи показывают, что реалистичные диапазоны неопределенности способны изменять оценку потенциальной выручки на 30 %. Следовательно, недостаточная работа с геологической неопределенностью имеет уже не только технический, но и прямой финансово-экономический эффект.

Пятая проблемная зона связана с разрывом между планированием, исполнением и отчетностью. В отраслевой аналитике данное ограничение описывается через разрозненность данных в цепочке «от рудника до рынка» и недостаточную интеграцию планирующих, операционных и отчетных систем. Такое состояние приводит к операционным неэффективностям, поскольку данные о планах, фактическом ходе работ, производственных отклонениях и итоговой отчетности не формируют единого управленческого контура[9]. В научной литературе о Mining 4.0, в частности в исследовании С. Жиронкина и О. Жиронкиной, данный вывод согласуется с представлением о том, что цифровая трансформация горнодобывающей промышленности затрагивает не отдельные функции, а всю взаимосвязь процессов разведки, добычи, транспортировки и первичной переработки полезных ископаемых [9]. Следовательно, проблемой становится не отсутствие отдельных цифровых инструментов, а недостаточная связность стадий отраслевого цикла.

Шестая проблемная зона относится к платформенной интеграции и цифровым двойникам. Ц. Цюй (J. Qu) и соавторы, делая комплексный обзор, отмечают, что внедрение цифровых двойников в минерально-сырьевом секторе остается медленным вследствие геологической непредсказуемости, сложности интеграции устаревших информационных систем, высокой стоимости, дефицита компетенций, требований к кибербезопасности и отсутствия стандартов [8]. В свою очередь, М.Е. Али (M.E. Ali) и соавторы показывают, что пространственные цифровые близнецы представляет собой не отдельную модель объекта, а многослойную цифровую архитектуру, включающую сбор данных, управление пространственными базами данных, аналитикой больших данных, промежуточное программное обеспечение ГИС, карты и программный интерфейс приложения (*англ.* Application Programming Interface, API), визуализацию, выполнение запросов, интеллектуальный анализ данных, моделирование и прогнозирование [14]. Следовательно, внедрение цифровых двойников в недропользовании [15] ограничивается не только качеством моделей, но и зрелостью всей инфраструктуры данных, сервисов, стандартов и компетенций.

Сопоставление приведенных источников позволяет выделить шесть документированных проблемных зон управленческого цикла недропользования:

1) высокую трудоемкость управления геонаучными данными при недостаточной зрелости плана организации работы с ними;
2) ограниченную видимость, прослеживаемость и надежность G&G-данных;

8 Morley C., Snowden D.V., Day D. Financial Impact of Resource/Reserve Uncertainty // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 1999. Vol. 99. Iss. 6. P. 293–301.

9 Breaking Down Data Silos: The Path to Mining Operational Excellence // International Mining, 2025. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://im-mining.com/2025/02/24/breaking-down-data-silos-the-path-to-mining-operational-excellence/ (дата обращения: 17.01.2026).

3) накопление неопределенности в геологической интерпретации и минерально-ресурсной оценке;
4) перенос ресурсной неопределенности в финансово-экономическую оценку проекта;
5) разрыв между планированием, исполнением и отчетностью;
6) недостаточную зрелость платформенной интеграции и цифровых двойников.

Тем самым проблематика геоинформационных сервисов управления недропользованием сводится не к расширению набора картографических продуктов, а к устранению разрывов между данными, моделями, операциями и экономически значимыми решениями.

## 3.3 Геоинформационные решения как инструменты устранения проблемных зон управленческого цикла недропользования

После выявления проблемных зон становится возможным переход от констатации отраслевых ограничений к анализу того, какие классы геоинформационных, геонаучных и платформенных решений способны снижать соответствующие разрывы. В данной логике технологические решения рассматриваются не как самостоятельные программные продукты, а как инструменты воздействия на конкретные параметры управленческого цикла: доступность и качество данных, прослеживаемость, неопределенность интерпретации, связь модели с ресурсной и экономической оценкой, контроль исполнения и повторное использование результатов.

Современные геоинформационные сервисы в недропользовании выполняют несколько управленческих функций: сокращают время доступа к пространственным и геолого-геофизическим данным, повышают прослеживаемость происхождения и версий данных, уменьшают интерпретационную неопределенность, связывают геологическую модель с ресурсной и экономической оценкой, обеспечивают операционный контроль, создают основу для повторного использования данных и формирования цифровых двойников [15]. В связи с этим их результативность должна оцениваться не только по техническим характеристикам программного продукта, но и по тому, какой разрыв управленческого цикла они устраняют. В табл. 2 охарактеризованы основные технологические решения геоинформационных сервисов от ведущих глобальных поставщиков, а также дефекты описанных выше проблемных зон, которые устраняются благодаря этим решениям.

**Таблица 2**
Соотнесение проблемных зон недропользования с классами геоинформационных решений

**Table 2**
Correlating problematic subsoil use zones with classes of geoinformation solutions

| Проблемная зона | Класс решений | Примеры | Основной эффект |
|---|---|---|---|
| Трудоемкий доступ и подготовка данных | ГИС-платформы и управление геоданными | ArcGIS (Esri) | Сокращение времени работы с данными |
| Низкая прослеживаемость и связность данных | Платформы интеграции и совместной работы | ArcGIS, Geoservice Exploration | Повышение качества и надежности данных |
| Неопределенность геологической интерпретации | Геонаучное программное обеспечение и 3D-моделирование | Leapfrog (Seequent) | Повышение обоснованности геологических решений |
| Ресурсная неопределенность при оценке проектов | Оценка минерально-сырьевой базы и планирование геолого-разведочных работ | Seequent, Datamine | Снижение инвестиционных рисков |
| Разрыв между планированием и исполнением | Операционные платформы планирования горных работ | Mining (Hexagon), Mine Operations (Esri) | Повышение контроля за работами и их эффективности |
| Недостаточная интеграция данных и моделей | Платформенные решения и цифровые двойники | Delfi (SLB) | Улучшение координации и ускорение принятия решений |

В табл. 2 показано, что на ранних этапах ключевое значение имеют ГИС-платформы, обеспечивающие доступ к данным, их подготовку и первичную пространственную консолидацию. На этапах интерпретации и оценки ресурсов возрастает роль геонаучного программного обеспечения, 3D-моделирования и оценки ресурсов, поскольку именно здесь пространственные и геолого-геофизические данные трансформируются в основание для проектных и инвестиционных решений. На стадиях исполнения и контроля работ на первый план выходят операционные платформы планирования горных работ, связывающие пространственные данные с фактическим ходом производственных процессов. Наконец, платформенные решения и цифровые двойники обеспечивают интеграцию данных, моделей и участников проекта, снижая разрыв между отдельными этапами недропользовательского цикла. Основной эффект таких решений проявляется не в самом факте цифровизации картографических или геолого-геофизических материалов, а в сокращении времени работы с данными, повышении их надежности, снижении неопределенности интерпретации, уменьшении инвестиционных рисков, усилении контроля исполнения и ускорении принятия решений.

## 3.4 Технологическая карта отечественных решений в контуре геоинформационного управления недропользованием

Российскую практику развития геоинформационных решений в недропользовании целесообразно рассматривать как два взаимосвязанных контура — институциональный и прикладной. Институциональный контур представлен государственными системами и организациями, обеспечивающими накопление, хранение, учет и предоставление пространственной и геологической информации. Прикладной контур образуют отечественные ГИС, горно-геологические информационные системы, решения для моделирования, подсчета запасов, планирования горных работ, полевого сбора данных и управления горно-геологической информацией.

Институциональный контур включает НСПД, Единый фонд геологической информации о недрах (ЕФГИ), Росгеолфонд, научно-производственную базу цифрового геологического картографирования и служит созданию базовых условий для преодоления фрагментации пространственных и геологических данных. Так, ЕФГИ ориентирован на учет, поиск, накопление, безопасное хранение и предоставление первичной и интерпретированной геологической информации о недрах, закрывая тем самым инфраструктурный уровень проблем, связанных с доступом, хранением и повторным использованием геолого-геофизических данных [5].

Сопоставление отечественных решений с ранее выделенными проблемными зонами показывает, что российский рынок, несмотря на внешнее давление и санкции, не находится в состоянии технологического вакуума. Напротив, по ключевым участкам недропользовательского цикла существуют функциональные решения: ГИС-поддержка и полевой сбор данных, горно-геологическое моделирование, подсчет запасов, планирование открытых горных работ, управление горно-геологическими данными и элементы операционного контроля. Однако открытые источники позволяют говорить о наличии преимущественно отдельных функциональных компонентов, а не о зрелой интегрированной экосистеме уровня «данные — модель — ресурсная оценка — планирование — исполнение — мониторинг — повторное использование данных».

| Проблемная зона | Зарубежный класс решений | Российские решения | Закрываемая функция | Основное ограничение |
|---|---|---|---|---|
| **Доступ и подготовка данных** | Геоинформационные системы и системы управления пространственными данными | НСПД, ЕФГИ, ГИС «ЦИКЛОН» | Поиск, хранение, первичная организация данных | Разрыв между фондами, геоинформационными и производственными системами |
| **Связность и прослеживаемость данных** | Платформы совместной работы с данными | ЕФГИ, Росгеолфонд, платформа «МАГМА Минерал» | Учет, передача, совместная работа | Слабая интеграция с проектным и операционным контуром |
| **Геологическая интерпретация** | Программное обеспечение геологического 3D-моделирования | Платформы «ГЕОМИКС Геология», «МАГМА Гео», ГИС INTEGRO | Каркасные и блочные модели | Необходимость связки с ресурсной и экономической оценкой |
| **Ресурсная оценка и планирование** | Программное обеспечение ресурсной оценки и планирования работ | ГЕОМИКС, МАЙНФРЭЙМ, система «МАГМА План» | Подсчет запасов, сценарное планирование | Недостаточность открытых данных о финансово-инвестиционной интеграции |
| **Исполнение работ и контроль за ними** | Операционные платформы планирования горных работ | МАЙНФРЭЙМ, система «МАГМА Контроль», ГИС «ЦИКЛОН» | Диспетчеризация, полевой сбор, контроль | Отсутствие подтвержденного сквозного контура «от рудников до рынка» |
| **Интеграция данных и моделей** | Цифровые двойники и среда для совместной работы с данными | Платформа «МАГМА Минерал», ГИС «ЦИКЛОН» | Управление данными, моделями и взаимодействием | Отсутствие зрелого открыто подтвержденного аналога SLB Delfi / Seequent Evo |

**Таблица 3**
Технологическая карта отечественных решений в контуре геоинформационного управления недропользованием

**Table 3**
Technological chart of domestic solutions within contour of subsoil use geoinformation control

В табл. 3, составленной авторами на основе ряда источников[10,11,12,13], представлена технологическая карта отечественных решений в контуре геоинформационного управления недропользованием с характеристикой основных ограничений.

## 3.5 Авторская модель перехода к сквозному сервисному контуру геоинформационного управления недропользованием

На рис. 2 отражена авторская интерпретация текущего и целевого состояния отечественного контура геоинформационного управления недропользованием. В левой части показано текущее состояние, характеризующееся наличием двух относительно самостоятельных уровней: государственного контура данных и прикладных отраслевых решений. Государственный контур представлен НСПД, ЕФГИ и Росгеолфондом, прикладной — отечественными программными решениями, обеспечивающими отдельные функции ГИС-поддержки, геологического моделирования, планирования и работы с горно-геологическими данными. Однако ключевое ограничение состоит в том, что эти элементы пока не образуют в полной мере сквозной управленческий контур: данные, модели, планирование, исполнение, мониторинг и экономическая оценка остаются связаны фрагментарно.

Целевая модель предполагает переход от функциональной разобщенности к интегрированному сервисному контуру, в котором государственные данные, корпоративные ГИС, горно-геологические модели, ресурсная оценка, планирование, исполнение, мониторинг и повторное использование данных объединены в единую управленческую архитектуру.

10 ГЕОМИКС Геология. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://geomix.ru/software/geomix/geologija/ (дата обращения: 17.01.2026).

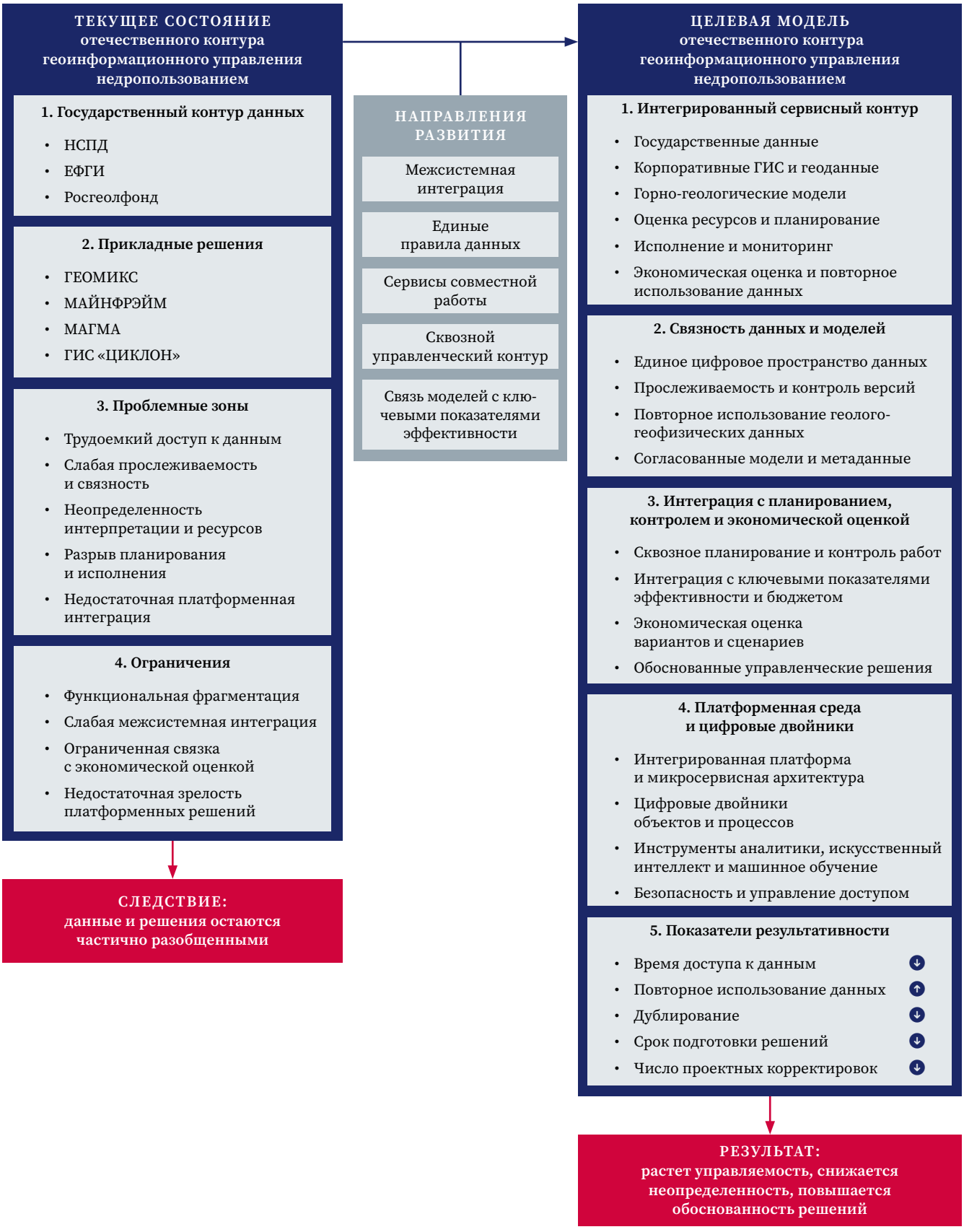
11 МАЙНФРЭЙМ планирование ОГР. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://mineframe.ru/majnfrejm-planirovanie-ogr/ (дата обращения: 17.01.2026).

12 Геология и горное дело / ЦИКЛОН. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://cyclonegis.ru/industries/mining/ (дата обращения: 17.01.2026).

13 МАГМА Минерал: платформа управления горно-геологическими данными. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://digital-horizon.ru/ru/produktyi/magma-mineral.html (дата обращения: 17.01.2026).

**Рис. 2**
Текущее состояние и целевая модель отечественного контура геоинформационного управления недропользованием

**Fig. 2**
Current state and target model of the domestic geoinformation management system for subsoil use



Такой переход необходим не ради цифровизации как таковой, а для устранения ранее выявленных проблемных зон: трудоемкого доступа к данным, слабой прослеживаемости, неопределенности интерпретации, разрыва между планированием и исполнением, недостаточной платформенной интеграции и слабой связи моделей с экономической оценкой проектов.

Переход к целевой модели должен обеспечиваться за счет пяти групп решений. Во-первых, требуется межсистемная интеграция государственных и корпоративных контуров данных, чтобы сведения из НСПД, ЕФГИ, корпоративных ГИС и отраслевых моделей могли использоваться в едином цифровом пространстве. Во-вторых, необходимы общие правила данных, версионности, метаданных и доступа, поскольку без этого невозможно обеспечить прослеживаемость происхождения данных и воспроизводимость аналитических выводов. В-третьих, горно-геологические модели должны быть связаны не только с картографическим и техническим описанием объекта, но и с ресурсной, проектной и финансово-экономической оценкой. В-четвертых, планирование, исполнение и мониторинг следует объединить через сквозные сервисы, позволяющие сопоставлять плановые параметры с фактическим ходом работ. В-пятых, требуется развитие платформенной архитектуры и цифровых двойников, обеспечивающих совместную работу участников, сценарное моделирование, контроль изменений и повторное использование данных.

Авторский вывод состоит в том, что основной резерв развития отечественного контура геоинформационного управления недропользованием находится не только в создании новых программных продуктов, а в интеграции существующих государственных и прикладных решений в единую сервисную архитектуру. Именно такая архитектура позволяет перевести пространственные и геолого-геофизические данные из режима хранения и локального использования в режим управленческого ресурса, влияющего на скорость подготовки решений, качество геологической интерпретации, инвестиционную обоснованность проектов, контролируемость работ и снижение дублирования исследований.

Следовательно, целевая модель должна рассматриваться как управленческо-экономическая модель цифровой трансформации недропользования. Ее результатом является не только повышение технологической зрелости ГИС и горно-геологических систем, но и изменение параметров отраслевого управленческого цикла: сокращение времени доступа к данным, повышение надежности и прослеживаемости информации, снижение неопределенности геологических и ресурсных оценок, уменьшение инвестиционных рисков, усиление контроля исполнения и рост повторного использования накопленных данных.

## 4 Выводы

Проведенное исследование позволило обосновать, что переход от картографического обеспечения к геоинформационным сервисам управления отражает изменение роли пространственных и геолого-геофизических данных в недропользовании. Они выступают не только информационной основой картографирования, но и ресурсом снижения неопределенности, трудозатрат, дублирования работ и управленческих рисков.

В статье выделены шесть документированных проблемных зон управленческого цикла недропользования, подтвержденных зарубежными научными исследованиями и отраслевыми данными: трудоемкое управление геонаучными данными, недостаточная прослеживаемость G&G-данных, накопление неопределенности в геологической и ресурсной оценке, влияние ресурсной неопределенности на финансовые параметры проекта, разрыв между планированием, исполнением и отчетностью, а также недостаточная зрелость платформенной интеграции и цифровых двойников.

Сопоставление этих проблемных зон с мировыми и отечественными решениями показало, что зарубежная практика развивается в направлении

платформенной интеграции данных, моделей, операций и совместной работы, тогда как российская практика представлена сочетанием государственного инфраструктурного контура и прикладных решений по отдельным стадиям недропользовательского цикла. Ключевое ограничение отечественного направления состоит не в отсутствии технологической базы, а в недостаточной связности государственных фондов данных, корпоративных ГИС, горно-геологических моделей, планирования, операционного контроля и экономической оценки.

Авторская целевая модель предполагает переход к сквозному сервисному контуру геоинформационного управления недропользованием. Практический смысл такой модели состоит в интеграции НСПД, ЕФГИ, Росгеолфонда, корпоративных ГИС, отечественных горно-геологических систем и инструментов планирования в единую архитектуру, результативность которой должна оцениваться через измеримые показатели: время доступа к данным, долю повторно используемой информации, снижение дублирования исследований, срок подготовки решений, число проектных корректировок, контролируемость выполнения работ и связь геомоделей с финансово-экономической оценкой проектов.

## библиография


1. Логинов Д.С. Картографическое обеспечение как процесс: концептуальная модель системы и ее применение // Геодезия и картография. 2026. № 2. С. 10–22. DOI:10.22389/0016-7126-2026-1028-2-10-22.
2. Наговицын О.В., Лукичев С.В. История развития отечественных горно-геологических информационных систем // Горная промышленность. 2024. № 5. С. 46–51. DOI:10.30686/1609-9192-2024-5-46-51.
3. Шпильман А.В., Чикишева А.В. Геоинформационные технологии для мониторинга недропользования // Недропользование XXI век. 2016. № 2 (69). С. 78–83.
4. Шутько С.Ю., Кожевникова С.Д., Шутько Д.С. Риски и неопределенности Upstream // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2017. № 1-2. С. 65–72.
5. Аракчеев Д.Б., Юон Е.М., Захаркин И.В. и др. ФГИС «Единый фонд геологической информации о недрах» как основа цифровой трансформации недропользования // Геология нефти и газа. 2021. № 3. С. 21–29. DOI:10.31087/0016-7894-2021-3-21-29.
6. Черемисина Е.Н., Финкельштейн М.Я., Деев К.В. и др. ГИС INTEGRO. Состояние и перспективы развития в условиях импортозамещения // Геология нефти и газа. 2021. № 3. С. 31–40. DOI:10.31087/0016-7894-2021-3-31-40.
7. Meindl B., Mendonca J. Mapping Industry 4.0 Technologies: From Cyber-Physical Systems to Artificial Intelligence // Preprint arXiv.org. 2021. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://arxiv.org/abs/2111.14168 (дата обращения: 17.01.2026).
8. Qu J., Kizil M.S., Yahyaei M., et al. Digital Twins in the Minerals Industry – A Comprehensive Review // Mining Technology: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy. 2023. Vol. 132. Iss. 4. P. 267–289. DOI:10.1080/25726668.2023.2257479.
9. Zhironkina O., Zhironkin S. Technological and Intellectual Transition to Mining 4.0: A Review // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 3. P. 1427. DOI:10.3390/en16031427.
10. Li S., Dragicevic S., Anton F., et al. Geospatial Big Data Handling Theory and Methods: A Review and Research Challenges // Preprint arXiv.org. 2016. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://arxiv.org/abs/1511.03010 (дата обращения: 17.01.2026).
11. Ang M.L.E., Owen J.R., Gibbins C.N., et al. Systematic Review of GIS and Remote Sensing Applications for Assessing the Socioeconomic Impacts of Mining // The Journal of Environment & Development. 2023. Vol. 32. Iss. 3. P. 243–273. DOI:10.1177/10704965231190126.
12. Mohamad A.A., Ujang U., Azri S., et al. Enhancing 3D Geospatial Modelling Through Multimodal Data and Machine Learning: A Systematic Literature Review // Spatial Information Research. 2026. Vol. 34. P. 12. DOI:10.1007/s41324-025-00659-4.
13. Lindi O.T., Aladejare A.E., Ozoji T.M., et al. Uncertainty Quantification in Mineral Resource Estimation // Natural Resources Research. 2024. Vol. 33. P. 2503–2526. DOI:10.1007/s11053-024-10394-6.
14. Ali M.E., Cheema M.A., Hashem T., et al. Enabling Spatial Digital Twins: Technologies, Challenges, and Future Research Directions // PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science. 2024. Vol. 92. P. 761–778. DOI:10.1007/s41064-024-00301-2.

15. Черемисина Е.Н., Костылева Т.В., Арутюн В.М. Цифровизация в геологоразведке: обзор и анализ современного состояния // Геоинформатика. 2021. № 4. С. 18–27. DOI:10.47148/1609-364X-2021-4-18-27.

## авторы

**Камынина Надежда Ростиславовна**
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
д-р экон. наук, канд. техн. наук, доцент
0009-0005-5170-5582

**Логинов Дмитрий Сергеевич**
loginov@geohorizon.ru
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра визуализации геоданных и картографического дизайна, картографический факультет
канд. техн. наук
0000-0003-0853-1757

**Поступила 22.01.2026. Принята к публикации 20.02.2026. Опубликована 27.02.2026.**

UDC 528.9:550.8:334
DOI:10.30533/GiA-2026-006

CC BY

# From Cartographic Support to Geoinformation Services for Subsoil Use Management: Global Practices, Russian Restrictions, and Economic Effects

**Nadezhda R. Kamynina**[1] ✉, **Dmitriy S. Loginov**[1]

[1] Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
✉ rector@miigaik.ru

**citation** Kamynina NR, Loginov DS. From Cartographic Support to Geoinformation Services for Subsoil Use Management: Global Practices, Russian Restrictions, and Economic Effects. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2026;70(1): 91–109. DOI:10.30533/GiA-2026-006.

**keywords** subsoil use, cartographic support, geoinformation service, spatial data, geological and geophysical data, digital twin, management and economic effect, digital transformation

**abstract** The article examines the rationale for transitioning from cartographic support for subsoil use to geoinformation management services from the perspective of the subsoil use management cycle as a capital-intensive and geographically distributed sphere of economic activity. Based on provisions for the digitalization of cartographic support and an analysis of international scientific and industry sources, documented problem areas in the subsoil use management cycle are identified: labor-intensive access to geoscientific data, insufficient traceability of geological and geophysical data, the accumulation of geological and resource uncertainty, the transfer of resource uncertainty to financial and economic assessment, the gap between planning, execution, and reporting, as well as the insufficient maturity of platform integration and digital twins. The role of geoinformation solutions as tools for addressing these identified problem areas is highlighted. Classes of international and domestic geoinformation solutions are systematized, and their functional role in eliminating these problem areas is demonstrated. The technological map of domestic solutions has been developed and a target model has been proposed for the transition to an end-to-end service contour for geoinformation management of subsoil use. Service sontour is represented by two independent levels of government data and applied industry solutions that provide geoinformation support functions for working with mining and geological data, increasing the reliability of information, reducing investment risks, and increasing the reuse of accumulated data.

**references**

1. Loginov DS. Kartograficheskoe obespechenie kak process: konceptual'naya model' sistemy i ee primenenie [Cartographic Support as a Process: Conceptual Model

of System and Its Application]. ***Geodesy and Cartography***. 2026;2: 10–22. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2026-1028-2-10-22.
2. Nagovicyn OV, Lukichev SV. Istoriya razvitiya otechestvennyh gorno-geologicheskih informacionnyh sistem [History of Development of the Russian Mining and Geological Information Systems]. ***Russian Mining Industry***. 2024;5: 46–51. (In Russian). DOI:10.30686/1609-9192-2024-5-46-51.
3. Shpil'man AV, Chikisheva AV. Geoinformacionnye tehnologii dlya monitoringa nedropol'zovaniya [Information Technology for Subsurface Monitoring]. ***21 Century Subsoil Use.*** 2016;2(69): 78–83. (In Russian).
4. Shutko SY, Kozhevnikova SD, Shutko DS. Riski i neopredelennost' Upstream [Risks and Uncertainties Upstream]. ***Oil and Gas Territory***. 2017;1-2: 65–72. (In Russian).
5. Arakcheev DB, Yuon EM, Zaharkin IV, et al. FGIS "Edinyj fond geologicheskoj informacii o nedrah" kak osnova cifrovoj transformacii nedropol'zovaniya [Unified Subsurface Geological Information Fund "Federal State Information System": Basis for Subsoil Use Digital Transformation]. ***Russian Oil and Gas Geology***. 2021;3: 21–29. (In Russian). DOI:10.31087/0016-7894-2021-3-21-29.
6. Cheremisina EN, Finkel'shtejn MYa, Deev KV, et al. GIS INTEGRO. Sostoyanie i perspektivy razvitiya v usloviyah importozameshcheniya [GIS INTEGRO. Status and Prospects for Development in the Context of Import Substitution]. ***Russian Oil and Gas Geology***. 2021;3: 31–40. (In Russian). DOI:10.31087/0016-7894-2021-3-31-40.
7. Meindl B, Mendonca J. Mapping Industry 4.0 Technologies: From Cyber-Physical Systems to Artificial Intelligence. ***Preprint arXiv.org.*** 2021. Available from: https://arxiv.org/abs/2111.14168 (Accessed 17 January 2026).
8. Qu J, Kizil MS, Yahyaei M, et al. Digital Twins in the Minerals Industry – A Comprehensive Review. ***Mining Technology: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy.*** 2023;132(4): 267–289. DOI:10.1080/25726668.2023.2257479.
9. Zhironkina O, Zhironkin S. Technological and Intellectual Transition to Mining 4.0: A Review. ***Energies.*** 2023;16(3): 1427. DOI:10.3390/en16031427.
10. Li S, Dragicevic S, Anton F, et al. Geospatial Big Data Handling Theory and Methods: A Review and Research Challenges. ***Preprint arXiv.org.*** 2016. Available from: https://arxiv.org/abs/1511.03010 (Accessed 17 January 2026).
11. Ang MLE, Owen JR, Gibbins CN, et al. Systematic Review of GIS and Remote Sensing Applications for Assessing the Socioeconomic Impacts of Mining. ***The Journal of Environment & Development.*** 2023;32(3): 243–273. DOI:10.1177/10704965231190126.
12. Mohamad AA, Ujang U, Azri S, et al. Enhancing 3D Geospatial Modelling through Multimodal Data and Machine Learning: A Systematic Literature Review. ***Spatial Information Research.*** 2026;34: 12. DOI:10.1007/s41324-025-00659-4.
13. Lindi OT, Aladejare AE, Ozoji TM, et al. Uncertainty Quantification in Mineral Resource Estimation. ***Natural Resources Research.*** 2024;33: 2503–2526. DOI:10.1007/s11053-024-10394-6.
14. Ali ME, Cheema MA, Hashem T, et al. Enabling Spatial Digital Twins: Technologies, Challenges, and Future Research Directions. ***PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science.*** 2024;92: 761–778. DOI:10.1007/s41064-024-00301-2.
15. Cheremisina EN, Kostyleva TV, Arutyun VM. Tsifrovizatsiya v geologorazvedke: obzor i analiz sovremennogo sostoyaniya [Digitalization in Geological Exploration: A Review and Analysis of the Current State]. ***Geoinformatika***. 2021;4: 18–27. (In Russian). DOI:10.47148/1609-364X-2021-4-18-27.

## authors

**Nadezhda R. Kamynina**
Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Dr. of Sci. (Economics), PhD in Engineering, Associate Professor
0009-0005-5170-5582

**Dmitriy S. Loginov**
loginov@geohorizon.ru
Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Visualization of Geodata and Cartographic Design, Faculty of Cartography
PhD in Engineering
0000-0003-0853-1757

**Submitted: January 22, 2026. Accepted: February 20, 2026. Published: February 27, 2026.**

УДК 528.9:004
DOI:10.30533/GiA-2026-008

CC BY

# Геоинформационная система оценки природно-техногенной сейсмичности месторождений полезных ископаемых

**О.А. Капустина**[1] ✉, **О.В. Антонова**[1]

[1] Оренбургский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Оренбург, Россия
✉ onica1@yandex.ru

**цитирование** Капустина О.А., Антонова О.В. Геоинформационная система оценки природно-техногенной сейсмичности месторождений полезных ископаемых // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 1. С. 110–127. DOI:10.30533/GiA-2026-008.

**ключевые слова** архитектура геоинформационной системы, методология построения геоинформационной системы, месторождение, полезные ископаемые, природно-техногенная сейсмичность

**аннотация** В настоящей работе предлагается методология построения специализированной геоинформационной системы (ГИС) для анализа пространственно-временной информации о фиксируемых явлениях сейсмичности в условиях техногенного воздействия на платформенных территориях с учетом региональных особенностей. Выделены основные компоненты методологии построения ГИС в виде базы источников, эмпирической, теоретической и инструментальной баз. Определен минимальный набор классов методов построения ГИС оценки природно-техногенной сейсмичности в районах добычи полезных ископаемых, который включает методы машинного обучения и многопараметрического анализа пространственной и пространственно-временной информации, а также позволяет оценивать сейсмический режим техноприродной системы и степень влияния параметров разработки месторождений на сейсмичность. Наиболее важным результатом настоящего исследования является разработанная функциональная структура ГИС оценки природно-техногенной сейсмичности, основными обеспечивающими подсистемами которой выступают: аппаратное обеспечение в виде сейсмологической сети «Нефтегазсейсмика»; математическое и информационное обеспечение, включающее базу геоданных объектно-реляционной системы управления базами данных PostgreSQL с геопространственным расширением PostGIS; интерактивное программное обеспечение, построенное по принципам объектно ориентированного программирования на языке Python, взаимодействующее с JavaScript

через QWebChannel и картографической визуализацией через компоненты на базе Folium / Leaflet.js. Основные модули ГИС для ввода, статистического анализа и визуализации данных протестированы на примере оценки общей сейсмичности Оренбургской области.

# 1 Введение

Необходимость ведения мониторинга геодинамической обстановки при освоении месторождений полезных ископаемых, согласно Федеральному закону РФ «О недрах»[1], способствует активному расширению сетей сейсмологических станций не только в сейсмоактивных, но и в малосейсмичных районах, например в Оренбургской области. Это приводит к повышению скорости поступления пространственных и пространственно-временных данных, в том числе об объектах и процессах добывающей промышленности на разрабатываемых месторождениях платформенных территорий.

По результатам мониторинга, согласно приказу Минприроды России «Об утверждении Положения о функциональной подсистеме мониторинга состояния недр единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций»[2], требуется проводить оценку состояния недр и прогнозирование их изменений под влиянием природных и техногенных факторов. Однако получаемые эмпирические пространственные данные разнородны, разнотипны и разноформатны, что затрудняет их анализ. В связи с этим требуется не только применять геоинформационные технологии с использованием геоинформационных систем (ГИС) общего назначения для выявления закономерностей и зависимостей между процессами разработки месторождений полезных ископаемых на платформенных территориях и развитием природно-техногенной сейсмичности на таких территориях, но и создавать специализированные ГИС.

В условиях перехода от зарубежных программных продуктов к программному обеспечению с открытым кодом наиболее применима ГИС общего назначения QGIS и (или) специальные веб-ГИС по сейсмологии, анализ состояния которых проведен Е.С. Подольской и ее соавторами [1]. В настоящее время работы по созданию и применению геоинформационных систем и технологий, позволяющих организовать сбор, хранение, обработку и анализ пространственно-временной информации о геодинамических и сейсмических процессах, активно ведут многие российские исследователи: В.Н. Опарин, В.В. Адушкин, В.Ф. Юшкин, В.П. Потапов и др. [2, 3]; В.Г. Гитис, А.Б. Дерендяев, К.Н. Петров, М.А. Витушко [4]; А.А. Какоурова, А.В. Ключевский и др. [5]; С.В. Корнилков, П.А. Рыбников, А.С. Ведерников, А.А. Панжин [6]; А.В. Михеева, П.Г. Дядьков, А.Г. Марчук [7]; А.С. Кануков, Д.А. Мельков [8]; Т.С. Блинова, В.В. Удоратин, Р.А. Дягилев и др. [9]; М.Ю. Нестеренко и др. [10]; Ю.А. Калуш, К.О.С. Кужугет, С.А. Чупикова, С.С.С. Монгуш [11] и др. В первую очередь усилия ученых направлены на решение практической задачи по созданию ГИС для мониторинга сейсмической активности и анализа сейсмоактивных территорий с ярко выраженной природной сейсмичностью. Такие системы являются малопригодными для анализа геодинамической, сейсмической информации и данных

1 О недрах: Федеральный закон Российской Федерации от 21 февраля 1992 г. № 2395-1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102014778 (дата обращения: 20.11.2025).

2 Об утверждении Положения о функциональной подсистеме мониторинга состояния недр единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций: приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 15 августа 2023 г. № 520. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202312060010 (дата обращения: 20.11.2025).

об эксплуатации месторождений полезных ископаемых в отношении малосейсмичных платформенных территорий.

Зарубежное научное сообщество не менее активно использует готовые решения ГИС и разрабатывает интеллектуальные подсистемы ГИС на основе машинного обучения для обработки и анализа пространственно-временной информации о природных и техногенных сейсмических событиях. Индийские ученые[3] [12, 13] ведут геоаналитические работы по оценке природной и техногенной сейсмичности на основе ГИС и машинного обучения. Китайские исследователи решают задачи пространственно-временного анализа сейсмичности и оценки сейсмической опасности методами кластерного анализа [14, 15], применяют сверточные нейронные сети для классификации и идентификации локальных природных и техногенных сейсмических событий [16]. Коллектив авторов из Малайзии, Индонезии и Объединенных Арабских Эмиратов провел оценку надежности различных методов искусственного интеллекта для прогнозирования природной сейсмичности на примере Малайзии [17], в результате чего была выделена простая модель двухслойной нейронной сети с пятью нейронами в каждом слое, обеспечивающая приемлемый уровень точности для прогнозирования. Представители американского научного сообщества также применяют методы машинного обучения для решения задач по прогнозированию техногенной сейсмичности [18].

В европейских странах при решении задач мониторинга природно-техногенной сейсмичности и управления ею [19, 20] одной из причин, вызывающих проблемы ее распознавания, считают высокую разнородность данных, что затрудняет применение одного и того же подхода к каждому исследуемому случаю. Отмечается необходимость систематизации и анализа геоинформации для изучения региональных и локальных геодинамических процессов [21].

В связи со всем вышесказанным актуальной можно считать разработку на базе программного обеспечения с открытым кодом ГИС, включающей интеллектуальные подсистемы на основе машинного обучения для обработки и анализа пространственно-временной информации о природных и техногенных сейсмических событиях.

Цель настоящей работы — спроектировать и разработать инструмент, позволяющий организовать сбор, хранение, обработку и анализ пространственно-временной информации (в том числе с применением машинного обучения) о геодинамических и сейсмических процессах, возникающих в результате антропогенной деятельности на малосейсмичных территориях.

## 2 Материалы и методы

В основе построения ГИС оценки природно-техногенной сейсмичности месторождений полезных ископаемых лежит подход интеграции геоданных и инструментов их анализа в рамках единого информационного пространства сети поставщиков и потребителей информации [22]. Методология построения ГИС включает совокупность основных компонентов: базы источников, эмпирической, теоретической и инструментальной баз, содержание которых представлено на рис. 1.

Применяемые методы можно разделить на следующие классы:

1) сбора и обработки исходной пространственно-временной информации (методы определения чувствительности сейсмологической сети на основе установления представительности регионального каталога сейсмических событий, методы первичного анализа геоданных, методы

3 Seshagiri Rao V., Kumar B. Computer Vision and Geoanalytics // National Symposium on “Geospatial Technology: Journey from Data to Intelligence” and Annual Convention of ISRS and ISG: Abstracts. Hyderabad: HICC, 2022. P. 85.

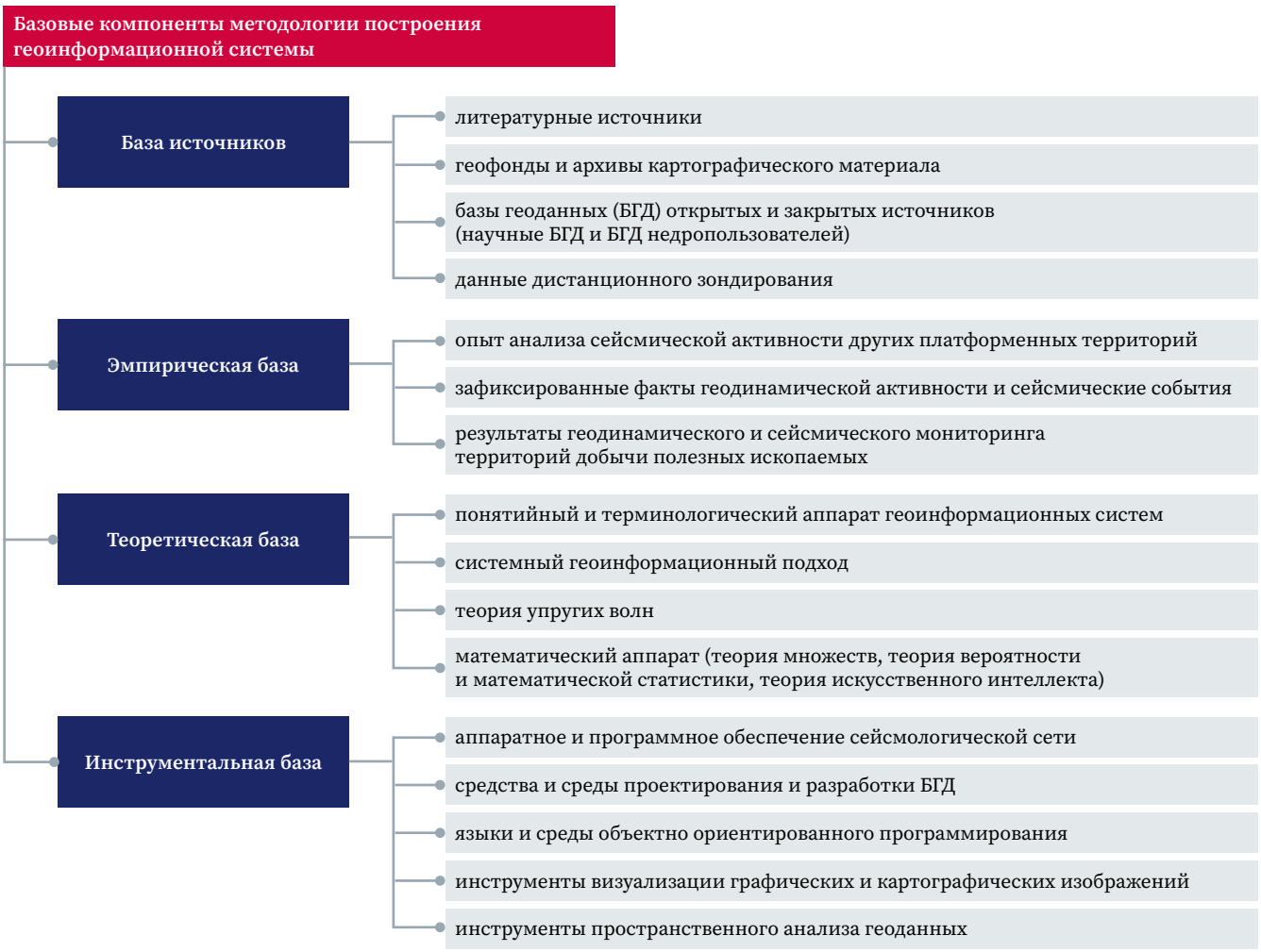



**Рис. 1**
Базовые компоненты методологии разработки ГИС

**Fig. 1**
The basic components of the GIS development methodology

оценки качества исходной геопространственной информации), которые позволяют выявлять аномалии в значениях координат сейсмических событий и (или) их отсутствие, пропуски по значениям и дублирующие записи основных характеристик сейсмических событий и параметров разработки месторождений;

2) анализа пространственно-временной информации для оценки сейсмического режима (классические методы оценки сейсмичности района с учетом ряда параметров [изменения во времени сейсмической активности и наклона графика повторяемости], определяющего зависимость между магнитудой и общим числом землетрясений [закон Гутенберга — Рихтера]; методы теории вероятности и математической статистики; методы машинного обучения, в частности методы кластерного анализа К-ближайших соседей и методы оптимального определения кластеров «локтя» и «силуэта»);
3) геопространственного анализа (метод определения плотности сейсмических событий и методы буферизации);
4) пространственной визуализации (картографический и графический методы);
5) проектирования и построения современных ГИС (метод разработки веб-ГИС на основе клиент-серверной архитектуры и метод разработки ГИС на основе готовых решений).

Для проектирования ГИС оценки сейсмичности месторождений полезных ископаемых применяется объектно ориентированный подход с унифицированным языком моделирования UML, применяемый для любых информационных систем. В качестве средств разработки используется среда разработки Jupyter Notebook с языком программирования Python и объектно-реляционной

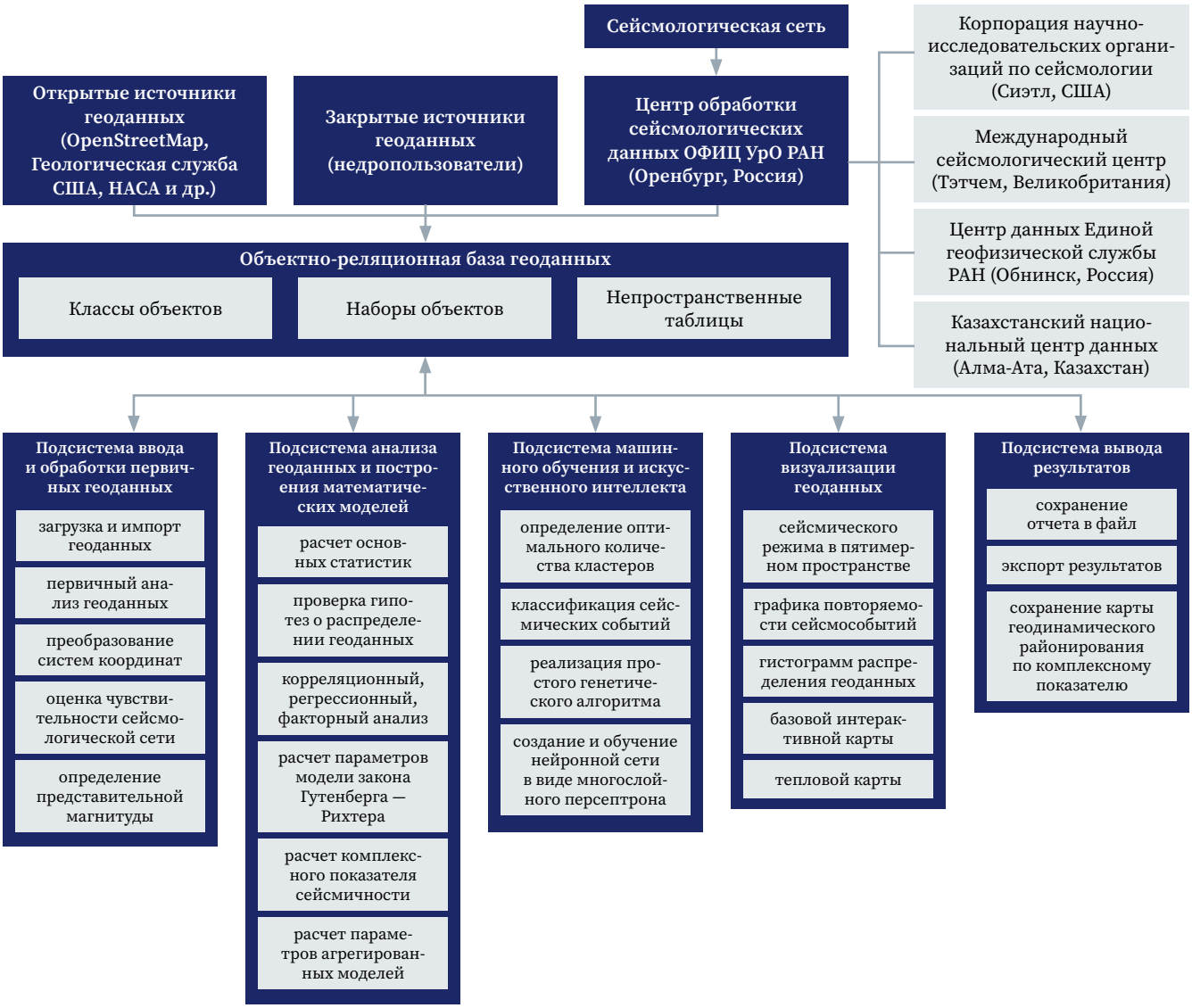
системы управления базами данных (СУБД) PostgreSQL, которая поддерживает расширяемость и соответствие стандартам SQL с геопространственным расширением PostGIS. Совместное использование этих инструментов обеспечивает хранение, анализ пространственных и пространственно-временных данных и управление ими, предоставляя возможности поддержки пространственных типов данных (точки, линии, полигоны), пространственных функций и операторов для выполнения сложных геометрических операций и пространственных индексов для ускорения выполнения запросов.

# 3 Результаты и обсуждение

## 3.1 Архитектура ГИС оценки сейсмичности месторождений

**Рис. 2**
Структура ГИС
**Fig. 2**
Structure of the GIS

С использованием современных средств проектирования и разработки информационных систем разработана структура ГИС оценки сейсмического режима эксплуатации месторождений полезных ископаемых Оренбургской области (рис. 2).



Рассмотрим основные структурные компоненты ГИС.

**1. Подсистема аппаратного обеспечения ГИС**
Подсистема аппаратного обеспечения ГИС в виде сейсмологической сети «Нефтегаз-сейсмика» состоит из 12 стационарных и 2 передвижных станций, 8 из которых подробно описаны в ежегоднике «Землетрясения России» [23]. В состав сети входят: аналоговые датчики в виде магнитоэлектрических сейсмоприемников СМ-3КВ на шести сейсмостанциях (Оренбург, Южный Урал, Донецкое, Троицкое, Лебяжка, Байтуган-3); электронно-молекулярные сейсмометры СМЕ-4311 на трех станциях (Байтуган-1, Байтуган-2, Олимпийское), для каждого из которых установлены регистраторы SDAS, UGRA или Байкал-8, выполняющие функции оцифровки аналогового сигнала, поступающего на аналоговые входы регистратора, и накопления и передачи данных в виде цифрового сигнала. Сейсмостанции Толкаевка и Моховое снабжены одной из самых распространенных моделей сейсмических датчиков (трехкомпонентным широкополосным велосиметром со встроенным регистратором CMG-6TD производства Guralp Systems), которые подходят для работы в полевых условиях в местах со средним уровнем шума как при временных, так и при постоянных установках [24].

**2. Подсистема обработки сейсмологических данных**
Подсистема обработки сейсмологических данных расположена в центре обработки сейсмологических данных отдела геоэкологии Оренбургского федерального исследовательского центра УрО РАН (ОФИЦ УрО РАН). Основные функции этой подсистемы заключаются:

- в обработке сейсмограмм, полученных по результатам функционирования сейсмологической сети средствами программного комплекса WSG, и ведении общего каталога всех регистрируемых событий (местных, эпицентры которых находятся в Оренбургской области, и региональных, происходящих в соседних областях);
- во взаимодействии с сейсмологическими центрами данных: Корпорацией научно-исследовательских организаций по сейсмологии (*англ.* Incorporated Research Institutions for Seismology) (Сиэтл, США); Единой геофизической службой Российской академии наук (Обнинск, Россия), куда транслируются данные станции федерального значения ORR и ежегодно пересылаются обобщенные сведения по зарегистрированным событиям; Международным сейсмологическим центром (*англ.* International Seismological Centre) (Тэтчем, Великобритания); Казахстанским национальным центром данных (КНЦД) (Алма-Ата, Казахстан), а также во взаимодействии с базами геоданных недропользователей Оренбургской области по поставке данных о параметрах разработки месторождений полезных ископаемых, с открытыми источниками географической, геологической, гидрологической информации OpenStreetMap, Геологической службой США (*англ.* United States Geological Survey), Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) (*англ.* National Aeronautics and Space Administration) и другими организациями.

**3. Объектно-реляционная база геоданных**
Объектно-реляционная база геоданных[4], концептуальная модель которой представлена на рис. 3, поддерживает такие функции и операции, как хранение различных типов данных, включая числовые, строковые, даты и геометрические типы данных (точки, линии и полигоны); хранение имени каждого объекта

4 Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025622328 Российская Федерация. База геоданных для оценки геодинамического состояния месторождений полезных ископаемых Оренбургской области: заявл. 12.05.2025: опубл. 28.05.2025 / М.Ю. Нестеренко, О.А. Капустина, О.В. Антонова; заявитель Оренбургский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Научно-производственное предприятие «Экотехнологии».

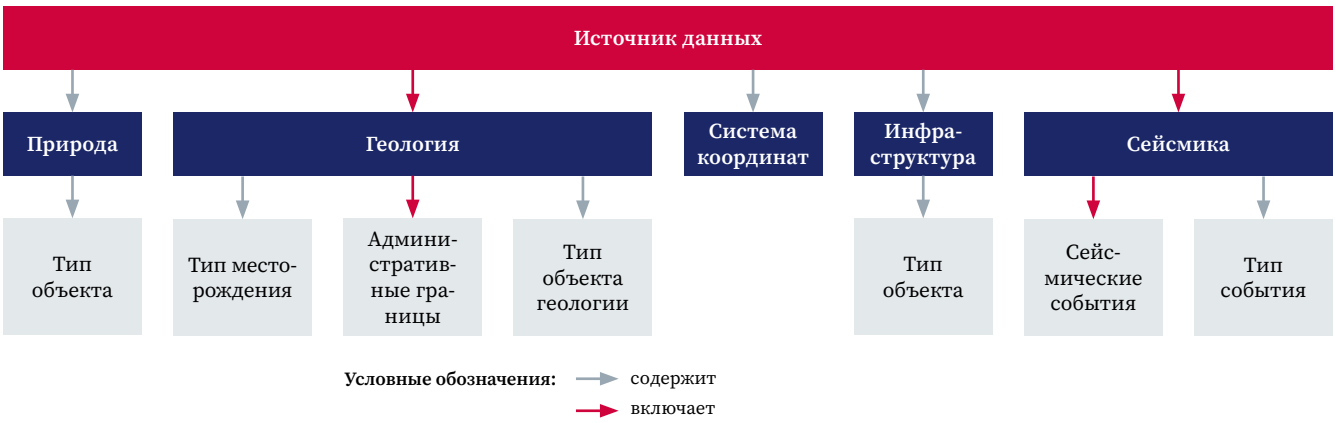



**Рис. 3**
Концептуальная модель базы геоданных

**Fig. 3**
Conceptual model of a geodata base

в базе геоданных (если оно присутствуют у объекта) и координат в отдельном атрибуте; хранение атрибутов, связанных с геометрическими объектами; импорт и экспорт данных в форматах Shapefile, GeoJSON и KML; обеспечивает высокую производительность при выполнении запросов и операций, связанных с геопространственными данными; реализует возможность оптимизации запросов и использования пространственных индексов для ускорения выполнения операций; поддерживает высокую надежность и доступность данных, включая механизмы репликации и резервного копирования.

Структуру базы геоданных определяют классы объектов и наборы этих классов: «Инфраструктура» (административные районы Оренбургской области, дороги, линии электропередач, тоннели), «Геология» (карьеры, шахты, месторождения — места, где осуществляется добыча газа, нефти, а также скважины добычи нефти и газа), «Природа» (пляжи, реки, пастбища, болота), «Сейсмика» (сейсмические события, типы сейсмических событий: природное, техногенное, взрыв, импульс), а также непространственные таблицы («Источники данных», «Система координат», «Типы объектов геологии», «Типы месторождения», «Типы объектов инфраструктуры», «Типы природных объектов», «Типы события»).

Сущности, атрибуты и связи, содержащиеся в логической модели объектно-реляционной базы геоданных, представлены в табл. 1.

**Таблица 1**
Сущности, атрибуты и связи базы геоданных

**Table 1**
Entities, attributes and relationships of the geodata database

| Сущность | Атрибуты | Связи |
|---|---|---|
| **Геология** | Тип геологического объекта, название объекта, пространственные координаты объекта, параметры месторождения, географическое отображение объекта и источник данных | Тип месторождения, тип объекта геологии; административные районы; источник данных |
| **Инфраструктура** | Тип объекта инфраструктуры, наименование объекта, пространственные координаты объекта, географическое отображение и источник данных | Тип объекта инфраструктуры; источник данных |
| **Природа** | Тип природного объекта, наименование объекта, пространственные координаты объекта, географическое отображение и источник данных | Тип природного объекта; источник данных |
| **Сейсмика** | Тип сейсмического события, пространственные координаты сейсмического события, время возникновения, глубина, локальная магнитуда сейсмического события, географическое отображение объекта и источник данных | Тип сейсмического события |
| **Источники данных** | Источник пространственных / пространственно-временных данных объектов | Система координат |
| **Административные границы** | Названия районов Оренбургской области | — |
| **Тип месторождения** | Характеристика месторождения | — |
| **Тип объекта геологии** | Тип геологического объекта | — |
| **Тип объекта инфраструктуры** | Тип объекта инфраструктуры | — |
| **Тип природного объекта** | Тип объекта природы | — |
| **Система координат** | Система координат, в которой выполнено географическое отображение исходных данных | — |
| **Тип сейсмического события** | Тип природного объекта, название объекта, пространственно-временные координаты объекта и источник данных | — |

Основные реализуемые запросы к базе геоданных — это выбор определенных месторождений и их вывод в географическом отображении; выбор определенного административного района и вывод всех месторождений в этом районе; выбор определенных объектов месторождений; выбор определенных объектов инфраструктуры; выбор определенных природных объектов; выбор определенных источников данных; выбор определенных систем координат; выбор по сейсмическим событиям и их типам.

Архитектура базы геоданных является внешней по отношению к ГИС. Связь осуществляется через открытое подключение к базе данных (*англ.* Open Database Connectivity), которое обеспечивает совместимость прикладных программ и использование различных приложений при работе с базами данных, а также позволяет программам посредством операторов языка SQL взаимодействовать с различными СУБД (как персональными, так и многопользовательскими), функционирующими в различных операционных системах [25].

**4. Программная подсистема оценки сейсмического режима**

Программная подсистема оценки сейсмического режима построена по принципам объектно ориентированного программирования, что обеспечивает расширяемость, поддерживаемость и независимость компонентов. Центральным компонентом архитектуры программной подсистемы является SeismicAnalisysApp, который агрегирует все остальные модули — загрузку и обработку данных, создание и отображение карты, фильтрацию событий в полигоне и построение математических моделей, графиков повторяемости сейсмических событий в выбранном полигоне, а также модули кластеризации, генетический алгоритм для определения оптимального количества кластеров, нейросеть в виде многослойного персептрона и модуля построения карт сейсмического районирования сеточным методом и по буферным зонам месторождений и карьеров. Для визуализации используются компоненты на базе Folium/Leaflet.js. Взаимодействие Python и JavaScript обеспечивается через QWebChannel. Основные функции приложения — загрузка геоданных из базы и их предварительная обработка, визуализация событий на интерактивной карте (Folium/Leaflet.js), выделение пользователем произвольных областей (полигонов) для анализа, кластеризация сейсмических событий, определение оптимального количества кластеров, построение карты сейсмического районирования и графиков повторяемости событий по выбранной области, расчет параметров сейсмического режима и экспорт результатов анализа и карт [26, 27].

## 3.2 Применение основных подсистем разработанной ГИС на примере Оренбургской области

### 3.2.1 Загрузка исходных геоданных о сейсмических событиях

Источниками пространственной и пространственно-временной информации для тестирования разработанной ГИС являются каталоги сейсмических событий, объединенные в единую базу геоданных средствами СУБД PostgreSQL. При подключении к базе геоданных и выполнении SQL-запросов используется модуль Psycopg2 для языка программирования Python. Результат запроса по каталогам сейсмических событий представляется с помощью библиотеки Pandas в формате таблиц объекта DataFrame. Пример результата описанной процедуры ввода и выборки рассматриваемого периода с 2008 по 2021 год проиллюстрирован для восточной части Оренбургской области в табл. 2 в виде фрагмента данных Казахстанского сейсмологического центра данных.

**Таблица 2**
Фрагмент каталога сейсмических событий

**Table 2**
A fragment of the seismic events catalog

| | date&time | lat | lon | depth | mb | K |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1647 | 2008-01-01 08:14:00 | 51,5612 | 59,3328 | 2 | 2,3 | 5,0 |
| 1648 | 2008-01-02 08:40:01 | 51,5815 | 59,3703 | 2 | 2,2 | 5,4 |
| 1649 | 2008-01-02 10:52:30 | 51,9429 | 58,9822 | 2 | 1,9 | 5,1 |
| 1650 | 2008-01-03 13:09:06 | 50,9098 | 60,5616 | 2 | 1,7 | 4,9 |
| 1651 | 2008-01-05 10:23:14 | 50,8976 | 59,5527 | 2 | 1,8 | 5,4 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 12432 | 2021-12-28 11:40:04 | 51,0496 | 59,9667 | 3 | 2,6 | 6,2 |
| 12433 | 2021-12-28 10:56:32 | 51,2995 | 58,7366 | 3 | 2,5 | 5,6 |
| 12434 | 2021-12-29 07:21:25 | 50,8240 | 59,8070 | 2 | 1,9 | 5,3 |
| 12435 | 2021-12-29 06:57:00 | 51,2244 | 58,7633 | 3 | 2,7 | 6,3 |
| 12436 | 2021-12-29 02:55:01 | 51,5619 | 58,7200 | 2 | 2,0 | 4,1 |

**Примечание:** `date&time` — время зарегистрированного сейсмического события в формате «год-месяц-день час:минуты:секунды»; `lat` — географическая широта очага сейсмического события в градусах; `lon` — географическая долгота очага сейсмического события в градусах; `depth` — глубина очага сейсмического события в километрах; `mb` — магнитуда сейсмического события, определенная по объемным волнам; `K` — энергетический класс сейсмического события.

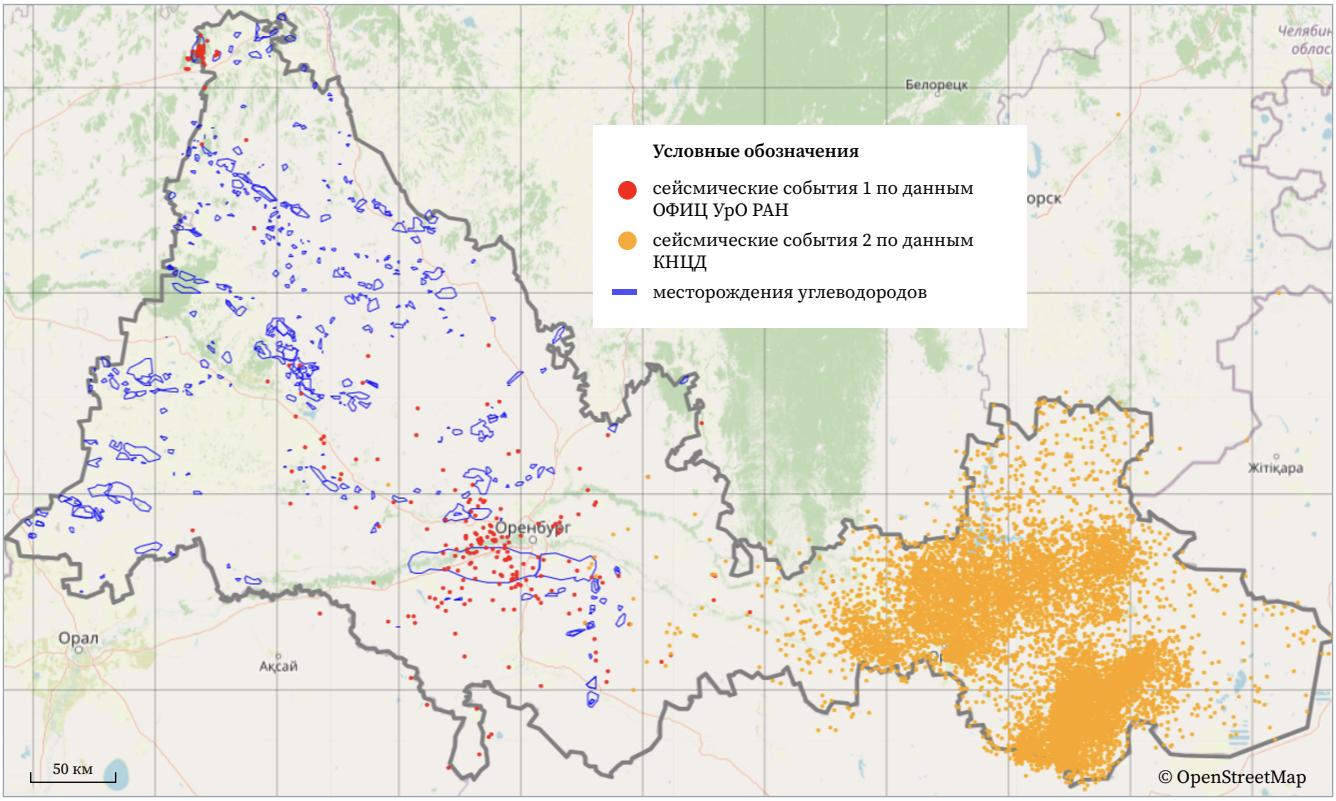
### 3.2.2 Пространственное распределение сейсмических событий

Географическое распределение сейсмических событий представим путем создания интерактивной карты Оренбургской области из открытого источника OpenStreetMap и добавления слоев, хранящихся в базе геоданных:

- слоя «Сейсмические события 1» (красные точки на рис. 4), в состав которого агрегированы данные из каталогов сейсмических событий месторождений углеводородов и который составлен по геоданным центра обработки сейсмологических данных отдела геоэкологии ОФИЦ УрО РАН;
- слоя «Сейсмические события 2» (оранжевые точки на рис. 4), составленного по каталогам КНЦД и хранящегося в разработанной базе геоданных;
- слоя «Месторождения углеводородов Оренбургской области» (синие полигоны на рис. 4).

**Рис. 4**
Географическое распределение сейсмических событий Оренбургской области за 2008–2021 гг.

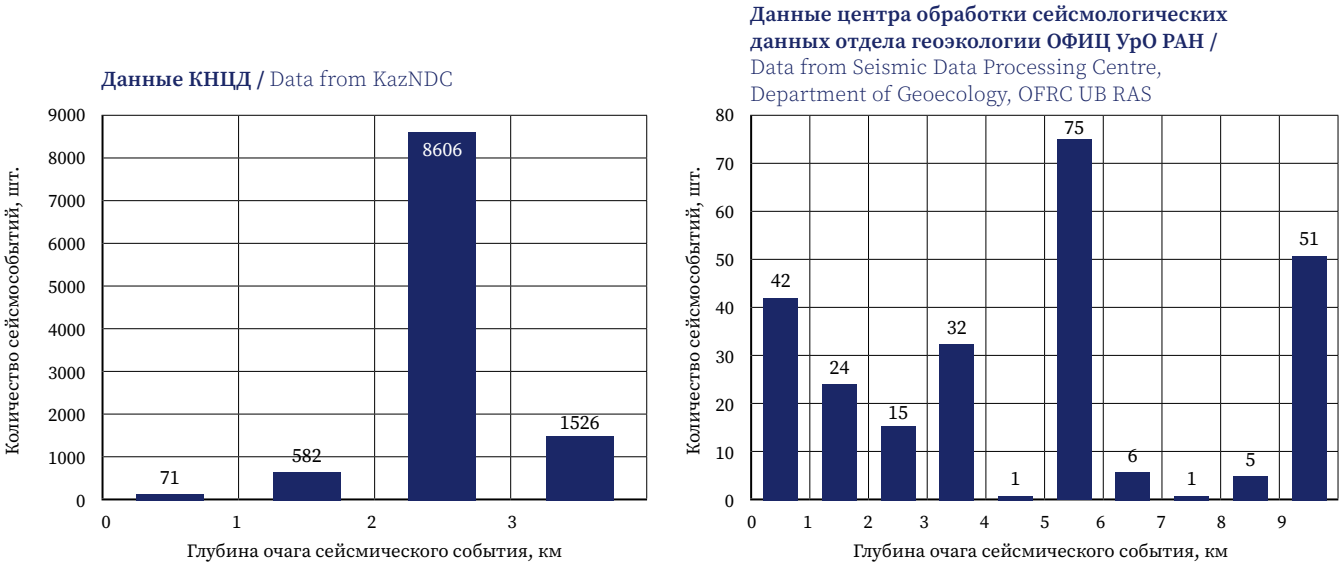
**Fig. 4**
Geographical distribution of seismic events in the Orenburg Region from 2008 to 2021



На основе пространственного распределения геоданных о сейсмических событиях, зарегистрированных на территории Оренбургской области, отмечается формирование четырех основных кластеров поверхностной сейсмичности. Два кластера находятся на востоке Оренбургской области. Их локализация привязана к районам активной разработки месторождений твердых полезных ископаемых с глубиной очага, не превышающей 4 км, по данным КНЦД (рис. 5). Кластер, расположенный в центральной части рассматриваемой территории, привязан к району эксплуатации Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения, а кластер в северо-западной части — к району разрабатываемого Байтуганского нефтяного месторождения с глубиной очага, не превышающей 10 км, по данным центра обработки сейсмологических данных отдела геоэкологии ОФИЦ УрО РАН (рис. 5).

**Рис. 5**
Частота сейсмических событий Оренбургской области по глубине очагов

**Fig. 5**
Frequency of seismic events in the Orenburg Region by depth of origin




### 3.2.3 Распределение сейсмических событий по энергетическому классу

Интенсивность природно-техногенных сейсмических событий, зарегистрированных на территории Оренбургской области разными сейсмологическими сетями, представлена в каталогах разными параметрами, сопоставление систем классификации землетрясений в локальных магнитудах исследовано в работе [28]. Для региональной сети «Нефтегаз-сейсмика» оценка проводится на основе сдвиговых волн по амплитуде колебаний грунта вблизи их эпицентра (*Ml*), а для сейсмологической сети Института геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан в связи с ее отдаленностью от рассматриваемой территории интенсивность оценивается на основе амплитуды продольных волн (*Mb*). В связи с этим для обобщенной оценки распределения сейсмических событий Оренбургской области используется такой параметр, как энергетический класс сейсмического события, представляющий собой десятичный логарифм энергии, высвобожденной очагом[5]. Распределение этого параметра на исследуемой территории (рис. 6) отражает типичную картину: значения энергетического класса *K* наблюдаемых сейсмических событий находятся в диапазоне от 3 до 8, что соответствует распространенному проявлению слабых колебаний земной коры, наблюдаемому в районах интенсивной добычи природных ресурсов.

5 Раутиан Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстояниях до 3000 км // Экспериментальная сейсмика: материалы Комплексной сейсмологической экспедиции. М.: Наука, 1964. С. 86–93.

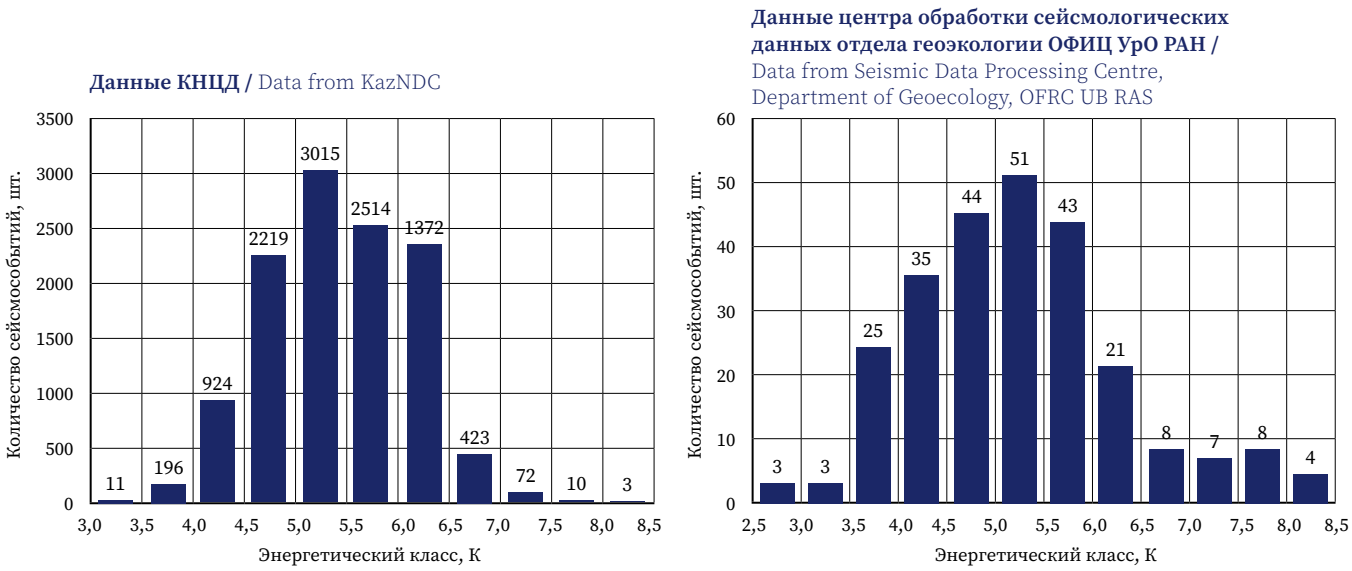



**Рис. 6**
Частота сейсмических событий Оренбургской области по энергетическому классу

**Fig. 6**
Frequency of seismic events in the Orenburg Region by energy class

### 3.2.4 Распределения сейсмических событий по времени

За период наблюдений с 2008 по 2021 год на территории Оренбургской области зарегистрировано около 13 тысяч сейсмических событий, из них сейсмологической сетью Института геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан — около 12,5 тысяч, Оренбургской региональной сетью «Нефтегаз-сейсмика» — несколько сотен (рис. 7). Около 70 % всех зарегистрированных сейсмических событий произошли в утренние и дневные часы (рис. 8), совпадающие с периодом активной производственной деятельности по добыче ресурсов, что свидетельствует о преимущественно антропогенном происхождении данных явлений.

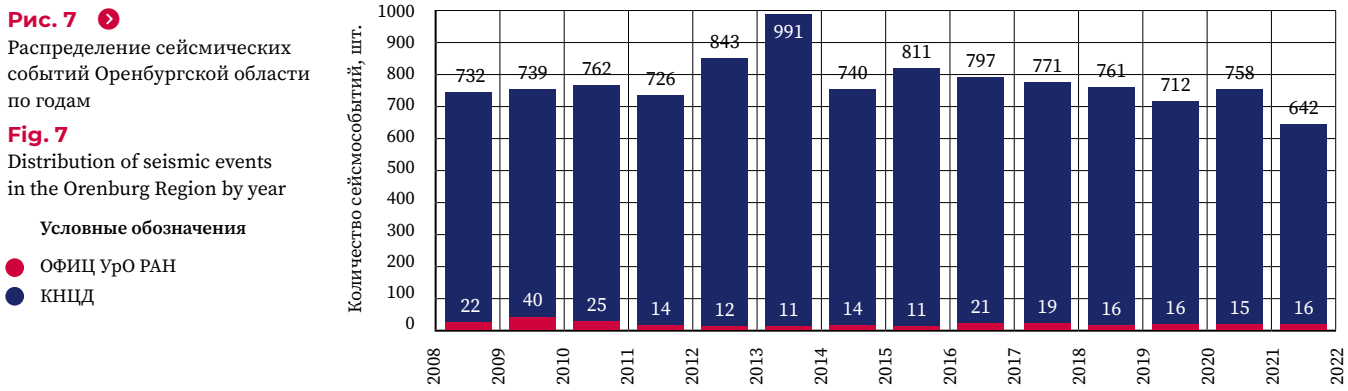



**Рис. 7**
Распределение сейсмических событий Оренбургской области по годам

**Fig. 7**
Distribution of seismic events in the Orenburg Region by year

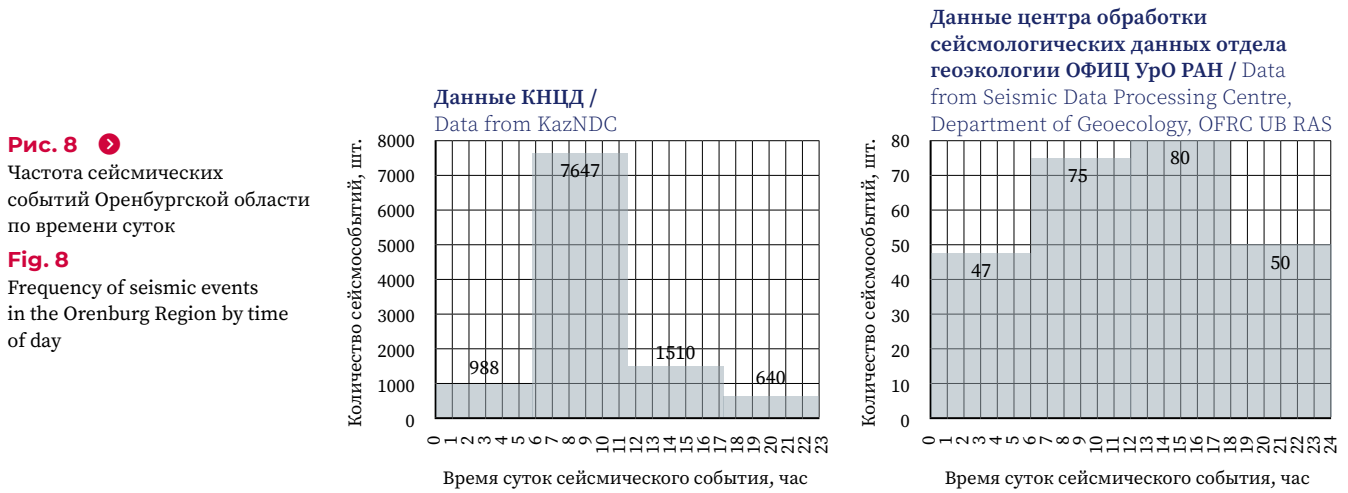



**Рис. 8**
Частота сейсмических событий Оренбургской области по времени суток

**Fig. 8**
Frequency of seismic events in the Orenburg Region by time of day

# 4 Выводы

Проведенное исследование позволило достичь следующих результатов:

1. Предложены научно-методологические основы построения веб-браузерной ГИС анализа региональной природно-техногенной сейсмичности на месторождениях углеводородов. Основными компонентами данной системы являются база источников, эмпирическая, теоретическая и инструментальная базы, включающие методы построения современных ГИС, методы сбора и обработки исходной пространственно-временной информации, методы анализа пространственно-временной информации для оценки сейсмического режима, методы геопространственного анализа и пространственной визуализации.
2. Средствами СУБД PostgreSQL разработана объектно-реляционная база геоданных для ввода, хранения, обработки географической, геологической, гидрологической информации о территориях разрабатываемых месторождений Оренбургской области, а также получаемой из различных открытых и закрытых источников (в разных форматах, структурах и системах координат) пространственно-временной информации о сейсмичности и параметрах разработки исследуемых месторождений.
3. Спроектирована архитектура ГИС (а затем разработана сама система), которая позволяет хранить разнородную пространственную и пространственно-временную информацию об объектах и процессах добывающей промышленности на территории разрабатываемых месторождений и реализовывать методы и алгоритмы обработки и анализа геоданных для оценки регистрируемых явлений слабой сейсмичности на платформенных территориях в условиях техногенного воздействия с учетом представления сейсмического режима в пятимерном пространстве.
4. Протестированы обеспечивающие подсистемы ГИС для ввода, хранения, обработки, анализа геоданных и визуализации на примере оценки общей сейсмичности Оренбургской области. На основе этого можно сделать вывод о формировании на рассматриваемой территории четырех основных кластеров, привязанных к районам активной добычи природных ресурсов, со слабой поверхностной сейсмичностью преимущественно антропогенного происхождения.

**благодарности**

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы FUUG-2022-0005 «Разработка научных основ комплексного природопользования, обеспечивающего устойчивое развитие природы с участием человека и с учетом его интересов на примере Южного Урала».

**библиография**

1. Подольская Е.С., Некрасова А.К., Прохорова Т.В. и др. Отечественный научный опыт использования веб-геоинформационных систем в сейсмологии // Russian Journal of Earth Sciences. 2025. Т. 25, № 5. ES5026. DOI:10.2205/2025es001035.
2. Опарин В.Н., Адушкин В.В., Юшкин В.Ф. и др. О влиянии природно-климатических и техногенных факторов на развитие механо-эрозионных и сейсмоэмиссионных процессов в окрестностях угольных разрезов Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 9. С. 72–101. DOI:10.25018/0236-1493-2019-09-0-72-101.
3. Опарин В.Н., Потапов В.П. Развитие теории и методов создания динамических геоинформационных систем с вычислительным ядром оценивания параметров движений и напряженно-деформированного состояния земной коры по разнородным комплексным наблюдениям // Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2019. Т. 2. С. 220–245.
4. Гитис В.Г., Дерендяев А.Б., Петров К.Н. и др. Геоинформационная платформа мониторинга геофизических полей, прогноза землетрясений и исследования сейсмогенных процессов // Информационные процессы. 2023. Т. 23, № 1. С. 168–183. DOI:10.53921/18195822_2023_23_1_168.

5. Какоурова А.А., Ключевский А.В., Демьянович В.М. и др. Геоинформационные критерии выделения квазилинейных цепочек миграции землетрясений в эпицентральных полях сложной геометрии и переменной плотности распределения толчков // Геоинформатика. 2021. № 2. С. 4–25. DOI:10.47148/1609-364X-2021-2-4-25.
6. Корнилков С.В., Рыбников П.А., Ведерников А.С. и др. О концепции создания геоинформационной системы «Безопасность природо- и недропользования» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № S23. С. 32–42. DOI:10.25018/0236-1493-2017-10-23-32-42.
7. Михеева А.В., Дядьков П.Г., Марчук А.Г. Геоинформационная система GIS-EEDB и методы пространственно-временного анализа сейсмологических данных // Геоинформатика. 2013. № 2. С. 58–65.
8. Кануков А.С., Мельков Д.А. Практическая реализация геоинформационной системы с поддержкой моделирования последствий опасных природно-техногенных процессов // Геология и геофизика Юга России. 2018. № 2. С. 30–45. DOI:10.23671/VNC.2018.2.14354.
9. Блинова Т.С., Удоратин В.В., Дягилев Р.А. и др. Сейсмичность и сейсмическое районирование слабоактивных территорий: монография. Пермь: Горный институт Уральского отделения РАН, 2015. 178 с.
10. Нестеренко М.Ю., Карпюк М.С., Влацкий В.В. Автоматизированная распределенная ГИС-система мониторинга и оценки риска функционирования природно-техногенных объектов нефтегазовой промышленности // Российскому научному обществу анализа риска 15 лет: основные итоги и перспективы деятельности. М.: ВНИИ ГОЧС МЧС России, 2018. С. 347–352.
11. Калуш Ю.А., Кужугет К.О.С., Чупикова С.А. и др. Анализ сейсмических событий в Республике Тыва с помощью геоинформационных технологий // Геоинформатика. 2012. № 4. С. 64–67.
12. Kumar H., Suman S., Rawat A., et al. A GIS Based Earthquake Hazard Pattern Identification Implementing the Local Site-Specific Parameters and the Historical Seismicity // Revue Internationale de Géomatique. 2025. Vol. 34. Iss. 1. P. 351–362. DOI:10.32604/rig.2025.064031.
13. Shalu, Acharya T., Gharekhan D., et al. Harnessing ML and GIS for Seismic Vulnerability Assessment and Risk Prioritization // Revue Internationale de Géomatique. 2024. Vol. 33. Iss. 1. P. 111–134. DOI:10.32604/rig.2024.051788.
14. Fan Z., Xu X. Application and Visualization of Typical Clustering Algorithms in Seismic Data Analysis // Procedia Computer Science. 2019. Vol. 151. P. 171–178. DOI:10.1016/j.procs.2019.04.026.
15. Shang X., Li X., Morales-Esteban A., et al. Data Field-Based K-Means Clustering for Spatio-Temporal Seismicity Analysis and Hazard Assessment // Remote Sensing. 2018. Vol. 10. Iss. 3. P. 461. DOI:10.3390/rs10030461.
16. Jia L., Chen H., Xing K. Rapid Classification of Local Seismic Events Using Machine Learning // Journal of Seismology. 2022. Vol. 26. Iss. 1. P. 897–912. DOI:10.1007/s10950-022-10109-5.
17. Essam Y., Kumar P., Ahmed A.N., et al. Exploring the Reliability of Different Artificial Intelligence Techniques in Predicting Earthquake for Malaysia // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2021. Vol. 147. P. 106826. DOI:10.1016/j.soildyn.2021.106826.
18. Navaid H.B., Eyinla D.S., Emadi H. Addressing the Complexities of Predicting Induced Seismicity: A Simplified Hybrid Approach to Understanding the Geomechanics of CO2 Injection in Faulted Reservoirs // Geoenergy Science and Engineering. 2026. Vol. 261. P. 214435. DOI:10.1016/j.geoen.2026.214435.
19. Grigoli F., Cesca S., Priolo E., et al. Current Challenges in Monitoring, Discrimination, and Management of Induced Seismicity Related to Underground Industrial Activities: A European Perspective // Reviews of Geophysics. 2017. Vol. 55. Iss. 2. P. 310–340. DOI:10.1002/2016RG000542.
20. Dost B., Ruigrok E., Spetzler J., et al. Natural and Induced Seismicity // Geology of the Netherlands: Second Edition / J.H. ten Veen, G.-J. Vis, J. de Jager, T.E. Wong (eds.). Amsterdam: Amsterdam University Press, 2025. P. 793–823. DOI:10.2307/jj.27435714.26.

21. Kuveždić Divjak A., Govorcin M., Matoš B., et al. Geoinformation for Research of Ongoing Geodynamic Processes in the Republic of Croatia // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2019. Vol. XLII-3/W8. P. 233–240. DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-3-W8-233-2019.
22. Быстров А.Ю., Майоров А.А. Обзор современных теорий и принципов построения мультифункциональных динамических мониторинговых геоинформационных систем // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2021. Т. 65, № 1. С. 108–116. DOI:10.30533/0536-101X-2020-65-1-108-116.
23. Асминг В.Э., Асминг С.В., Баранов С.В. и др. Восточно-Европейская платформа, Урал и Западная Сибирь // Землетрясения России в 2022 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2024. С. 31–38.
24. Нестеренко М.Ю., Алешин И.М., Гоев А.Г. и др. Оренбургская региональная сеть «Нефтегаз-сейсмика» // Сейсмические приборы. 2023. Т. 59, № 2. С. 5–17. DOI:10.21455/si2023.2-1.
25. Матчин В.Т. Базы геоданных // Образовательные ресурсы и технологии. 2017. № 3 (20). С. 100–108. DOI:10.21777/2500-2112-2017-3-100-108.
26. Капустина О.А., Автайкина О.А. Подсистема интерактивного анализа сейсмических данных с использованием полигонального выбора областей // Актуальные вопросы обеспечения комплексной безопасности: материалы Национальной научно-практической конференции с международным участием, посвященной 35-летию МЧС России и 95-летию Оренбургского ГАУ, Оренбург, 23 мая 2025 г. Оренбург: Оренбургский ГАУ, 2025. С. 1701–1705.
27. Капустина О.А., Нестеренко М.Ю., Антонова О.В. Первичный анализ пространственно-временных данных для оценки геодинамического состояния месторождений полезных ископаемых // Отходы и ресурсы. 2025. Т. 12, № 2. 13INOR225. DOI:10.15862/13INOR225.
28. Петрова Н.В., Курова А.Д. Сопоставление систем классификации землетрясений в локальных магнитудах *ML* в некоторых регионах Северной Евразии // Российский сейсмологический журнал. 2023. Т. 5, № 2. С. 61–76. DOI:10.35540/2686-7907.2023.2.05.


## авторы


**Капустина Оксана Александровна**
ФГБУН «Оренбургский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (ОФИЦ УрО РАН), Оренбург, Россия
отдел геоэкологии
канд. техн. наук, доцент
0000-0001-8981-6599

**Антонова Ольга Викторовна**
olga-oren@rambler.ru
ФГБУН «Оренбургский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (ОФИЦ УрО РАН), Оренбург, Россия
отдел геоэкологии


**Поступила 28.11.2025. Принята к публикации 20.02.2026. Опубликована 27.02.2026.**

UDC 528.9
DOI:10.30533/GiA-2026-008

CC BY

# Geoinformation System for Assessing Natural and Technogenic Seismicity of Mineral Deposits

**Oksana A. Kapustina**[1] ✉, **Olga V. Antonova**[2]

[1] Orenburg Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia
✉ onica1@yandex.ru

**citation** Kapustina OA, Antonova OV. Geoinformation System for Assessing Natural and Technogenic Seismicity of Mineral Deposits. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2026;70(1): 110–127. DOI:10.30533/GiA-2026-008.

**keywords** architecture of a geographic information system, methodology for geographic information system development, deposit, minerals, natural and man-made seismicity

**abstract** In this paper, we propose a methodology for building a specialized geoinformation system for analyzing spatiotemporal information about recorded seismic phenomena under conditions of anthropogenic impact on platform territories, taking into account regional peculiarities. The main components of the geoinformation system construction methodology are highlighted in the form of a database of sources, an empirical base, a theoretical base and an instrumental base. A minimum set of classes of methods for constructing a geoinformation system for assessing natural and man-made seismicity in mining areas has been determined, characterized by the presence of machine learning methods and multiparametric analysis of spatial and spatiotemporal information, which makes it possible to assess the seismic regime of the techno-natural system and the degree of influence of field development parameters on seismicity. The most important result of this study is the developed functional structure of a geoinformation system for assessing natural and man-made seismicity. The main supporting subsystems of which are: hardware in the form of the Neftegaz-seismika seismological network, mathematical, and information support, including the geodata database of the Postgre SQL object-relational database management system with the PostGIS geospatial extension, interactive software built according to the principles of object-oriented programming in Python, interacting with JavaScript via QWebChannel and cartographic visualization through Folium-based components / Leaflet.js. The authors tested the main modules of the geoinformation system for data input, statistical analysis, and visualization using the example of assessing the overall seismicity of the Orenburg Region.

**acknowledgements** The work was carried out as part of the state budget topic FUUG-2022-0005 "Development of scientific foundations for integrated environmental management that ensures sustainable development of nature with human participation and consideration of human interests, using the example of the Southern Urals".

**references**

1. Podol'skaya ES, Nekrasova AK, Prohorova TV, et al. Otechestvennyj nauchnyj opyt ispol'zovaniya veb-geoinformacionnyh sistem v sejsmologii [Russian Scientific Experience of Using Web-Based Geoinformation Systems in Seismology]. ***Russian Journal of Earth Sciences.*** 2025;25(5): ES5026. (In Russian). DOI:10.2205/2025es001035.
2. Oparin VN, Adushkin VV, Yushkin VF, et al. O vliyanii prirodno-klimaticheskih i tehnogennyh faktorov na razvitie mehano-erozionnyh i seysmoemissionnyh processov v okrestnostyah ugol'nyh razrezov Kuzbassa [Influence of Natural Climate and Mining-Induced Impact on Mechanical Erosion and Seismic Noise in the Areas of Open Pit Coal Mines in Kuzbass]. ***Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal).*** 2019;9: 72–101. (In Russian). DOI:10.25018/0236-1493-2019-09-0-72-101.
3. Oparin VN, Potapov VP. Razvitie teorii i metodov sozdaniya dinamicheskih geoinformacionnyh sistem s vychislitel›nym yadrom ocenivaniya parametrov dvizheniy i napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zemnoy kory po raznorodnym kompleksnym nablyudeniyam [Development of Theory and Methods for Creating Dynamic Geoinformation Systems with a Computational Core for Estimating the Parameters of Movements and the Stress-Strain State of the Earth's Crust Based on Heterogeneous Complex Observations]. ***Geomechanical Fields and Processes: Experimental-and-Analytical Research into Initiation and Growth of Source Zones of Disastrous Events in Geotechnical and Natural Systems.*** Novosibirsk: SB RAS; 2019;2: 220–245. (In Russian).
4. Gitis VG, Derendyaev AB, Petrov KN, et al. Geoinformacionnaya platforma monitoringa geofizicheskih poley, prognoza zemletryaseniy i issledovaniya seysmogennyh processov [Geoinformation Monitoring Platform of Geophysical Fields, Earthquake Prediction and Seismogenic Processes Studies]. ***Information Processes***. 2023;23(1): 168–183. (In Russian). DOI:10.53921/18195822_2023_23_1_168.
5. Kakourova AA, Klyuchevskiy AV, Dem'yanovich VM, et al. Geoinformacionnye kriterii vydeleniya kvazilineynyh cepochek migracii zemletryaseniy v epicentral'nyh polyah slozhnoy geometrii i peremennoy plotnosti raspredeleniya tolchkov [Geoinformational Criteria for Distinguishing the Quasi-Linear Chains of Earthquake Migration in Epicentral Fields of Complex Geometry and Variable Density of Shocks Distribution]. ***Geoinformatika.*** 2021;2: 4–25. (In Russian). DOI:10.47148/1609-364X-2021-2-4-25.
6. Kornilkov SV, Rybnikov PA, Vedernikov AS, et al. O koncepcii sozdaniya geoinformacionnoy sistemy "Bezopasnost' prirodo- i nedropol'zovaniya" [On the Concept of Creation of the Geoinformation System "Safety of Nature and Subsoil Use"]. ***Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal).*** 2017;S23: 32–42. (In Russian). DOI:10.25018/0236-1493-2017-10-23-32-42.
7. Miheeva AV, Dyad'kov PG, Marchuk AG. Geoinformacionnaya sistema GIS-EEDB i metody prostranstvenno-vremennogo analiza seysmologicheskih dannyh [Geoinformation System GIS-EEDB and Methods of the Spatial-Temporal Analysis of Seismologic Data]. ***Geoinformatika.*** 2013;2: 58–65. (In Russian).
8. Kanukov AS, Mel'kov DA. Prakticheskaya realizaciya geoinformacionnoy sistemy s podderzhkoy modelirovaniya posledstviy opasnyh prirodno-tehnogennyh processov [Practical Implementation of Geographic Information System with Support for Modeling the Effects of Dangerous Natural and Man-Made Processes]. ***Geology and Geophysics of Russian South.*** 2018;2: 30–45. (In Russian). DOI:10.23671/VNC.2018.2.14354.
9. Blinova TS, Udoratin VV, Dyagilev RA, et al. ***Seysmichnost' i seysmicheskoe rayonirovanie slaboaktivnyh territoriy*** [Seismicity and Seismic Zoning of Weakly Active Territories] [monograph]. Perm: Mining Institute of the Ural Branch of RAS; 2015. 178 p. (In Russian).
10. Nesterenko MYu, Karpyuk MS, Vlatskii VV. Avtomatizirovannaya raspredelennaya GIS-sistema monitoringa i otsenki riska funktsionirovaniya prirodno-tekhnogennykh ob"ektov neftegazovoi promyshlennosti [Automated Distributed GIS-System of Monitoring and Risk Assessment of the Functioning of Natural and Technogenic Objects of the Oil and Gas Industry]. ***Russian Scientific Society for Risk Analysis Is 15 Years***

*Old: The Main Results and Prospects of Its Activities.* Moscow: All-Russian Scientific Research Institute for Civil Defence and Emergencies of the EMERCOM of Russia; 2018: 347–352. (In Russian).
11. Kalush YuA, Kuzhuget KOS, Chupikova SA, et al. Analiz seysmicheskih sobytiy v Respublike Tyva s pomosch'yu geoinformacionnyh tehnologiy [An Analysis of the Seismic Events in the Republic of Tuva with Use of Geoinformation Technologies]. ***Geoinformatika.*** 2012;4: 64–67. (In Russian).
12. Kumar H, Suman S, Rawat A, et al. A GIS Based Earthquake Hazard Pattern Identification Implementing the Local Site-Specific Parameters and the Historical Seismicity. ***Revue Internationale de Géomatique.*** 2025;34(1): 351–362. DOI:10.32604/rig.2025.064031.
13. Shalu, Acharya T, Gharekhan D, et al. Harnessing ML and GIS for Seismic Vulnerability Assessment and Risk Prioritization. ***Revue Internationale de Géomatique.*** 2024;33(1): 111–134. DOI:10.32604/rig.2024.051788.
14. Fan Z, Xu X. Application and Visualization of Typical Clustering Algorithms in Seismic Data Analysis. ***Procedia Computer Science.*** 2019;151: 171–178. DOI:10.1016/j.procs.2019.04.026.
15. Shang X, Li X, Morales-Esteban A, et al. Data Field-Based K-Means Clustering for Spatio-Temporal Seismicity Analysis and Hazard Assessment. ***Remote Sensing.*** 2018;10(3): 461. DOI:10.3390/rs10030461.
16. Jia L, Chen H, Xing K. Rapid Classification of Local Seismic Events Using Machine Learning. ***Journal of Seismology.*** 2022;26(1): 897–912. DOI:10.1007/s10950-022-10109-5.
17. Essam Y, Kumar P, Ahmed AN, et al. Exploring the Reliability of Different Artificial Intelligence Techniques in Predicting Earthquake for Malaysia. ***Soil Dynamics and Earthquake Engineering.*** 2021;147: 106826. DOI:10.1016/j.soildyn.2021.106826.
18. Navaid HB, Eyinla DS, Emadi H. Addressing the Complexities of Predicting Induced Seismicity: A Simplified Hybrid Approach to Understanding the Geomechanics of $CO_2$ Injection in Faulted Reservoirs. ***Geoenergy Science and Engineering.*** 2026;261: 214435. DOI:10.1016/j.geoen.2026.214435.
19. Grigoli F, Cesca S, Priolo E, et al. Current Challenges in Monitoring, Discrimination, and Management of Induced Seismicity Related to Underground Industrial Activities: A European Perspective. ***Reviews of Geophysics.*** 2017;55(2): 310–340. DOI:10.1002/2016RG000542.
20. Dost B, Ruigrok E, Spetzler J, et al. Natural and Induced Seismicity. ***Geology of the Netherlands: Second Edition***. Veen ten JH, Vis GJ, Jager de J, Wong TE. (eds.). Amsterdam: Amsterdam University Press; 2025: 793–823. DOI:10.2307/jj.27435714.26.
21. Kuveždić Divjak A, Govorcin M, Matoš B, et al. Geoinformation for Research of Ongoing Geodynamic Processes in the Republic of Croatia. ***The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.*** 2019;XLII-3/W8: 233–240. DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-3-W8-233-2019.
22. Bystrov AYu, Mayorov AA. Obzor sovremennyh teoriy i principov postroeniya mul'tifunkcional'nyh dinamicheskih monitoringovyh geoinformacionnyh sistem [Overview of Modern Theories and Principles of Construction Multifunctional Dynamic Monitoring Geographic Information Systems]. ***Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying.*** 2021;65(1): 108–116. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2020-65-1-108-116.
23. Asming VE, Asming SV, Baranov SV, et al. Vostochno-Evropeiskaya platforma, Ural i Zapadnaya Sibir' [The Eastern European Platform, the Urals and Western Siberia]. ***Earthquakes in Russia in 2022.*** Obninsk: GS RAS; 2024: 31–38. (In Russian).
24. Nesterenko MYu, Aleshin IM, Goev AG, et al. Orenburgskaya regional'naya set' "Neftegaz-seysmika" [Orenburg Regional Network "Neftegaz-seismika"]. ***Seismic Instruments.*** 2023;59(2): 5–17. (In Russian). DOI:10.21455/si2023.2-1.
25. Matchin VT. Bazy geodannyh [Geodatabases]. ***Education Resources and Technologies.*** 2017;3(20): 100–108. (In Russian). DOI:10.21777/2500-2112-2017-3-100-108.
26. Kapustina OA, Avtaikina OA. Podsistema interaktivnogo analiza seismicheskikh dannykh s ispol'zovaniem poligonal'nogo vybora oblastei [Subsystem for Interactive Analysis of Seismic Data Using Polygonal Selection of Areas]. ***Topical Issues of Ensuring Integrated Security: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference with International Participation Dedicated to the 35th Anniversary of the EMERCOM***

*of Russia and the 95th Anniversary of the Orenburg State Agrarian University, Orenburg, May 23, 2025.* Orenburg: Orenburg SAU; 2025: 1701–1705. (In Russian).
27. Kapustina OA, Nesterenko MYu, Antonova OV. Pervichnyj analiz prostranstvenno-vremennyh dannyh dlya ocenki geodinamicheskogo sostoyaniya mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh [Primary Analysis of Spatiotemporal Data to Assess the Geodynamic State of Mineral Deposits]. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2025;12(2): 13INOR225. (In Russian). DOI:10.15862/13INOR225.
28. Petrova NV, Kurova AD. Sopostavlenie sistem klassifikatsii zemletryasenii v lokal'nykh magnitudakh *ML* v nekotorykh regionakh Severnoi Evrazii [Comparison of Earthquake Classification Systems in Local Magnitudes ML in Some Regions of Northern Eurasia]. *Russian Journal of Seismology.* 2023;5(2): 61–76. (In Russian). DOI:10.35540/2686-7907.2023.2.05.

## authors

**Oksana A. Kapustina**
Orenburg Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia
Department of Geoecology
PhD in Engineering, Associate Professor
0000-0001-8981-6599

**Olga V. Antonova**
olga-oren@rambler.ru
Orenburg Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia
Department of Geoecology

**Submitted: November 28, 2025. Accepted: February 20, 2026. Published: February 27, 2026.**

УДК 004.65:631.95
DOI:10.30533/GiA-2026-007

CC BY

# Применение базы пространственно-временных геоданных для оценки современного радиоэкологического состояния сельскохозяйственных земель Брянской области, временно выведенных из оборота

**В.В. Кречетников**[1] ✉, **И.Е. Титов**[2], **О.А. Шубина**[2], **Е.О. Кречетникова**[2]

[1] АО «Прорыв», Москва, Россия
[2] Курчатовский институт, Москва, Россия
✉ viktor.krechetnikov@mail.ru

**цитирование** Кречетников В.В., Титов И.Е., Шубина О.А., Кречетникова Е.О. Применение базы пространственно-временных геоданных для оценки современного радиоэкологического состояния сельскохозяйственных земель Брянской области, временно выведенных из оборота // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 1. С. 128–140. DOI:10.30533/GiA-2026-007.

**ключевые слова** отчужденная территория, пространственные данные, авария на Чернобыльской атомной электростанции, радиоактивное загрязнение, реабилитационная технология, база данных

**аннотация** В статье описана разработанная база пространственно-временных геоданных радиологического состояния отчужденных сельскохозяйственных угодий Брянской области. Представлен обзор источников информации для наполнения базы, а также обоснован выбор формата хранения собранной информации. В рамках работ по наполнению базы пространственных данных было добавлено 3049 записей в 31 таблице. Отдельные сведения приведены в таблицах без пространственной привязки. Основная часть данных, характеризующих различные свойства реальных участков, представлена в виде атрибутов ранее созданных и обновленных векторных объектов. С использованием базы пространственно-временных геоданных была проведена оценка современной радиоэкологической обстановки на сельскохозяйственных землях Брянской области, временно выведенных из оборота. Осуществлен анализ собранной информации о различных показателях состояния исследуемой территории. В дальнейшем на основе базы данных планируется создать расчетно-аналитические модули для прогнозных оценок радиологической ситуации, а также разработать рекомендации по проведению в случае необходимости реабилитационных мероприятий. Собранные и организованные пространственные данные впоследствии будут встроены в веб-картографические сервисы для публичного доступа.

# 1 Введение

Авария на Чернобыльской атомной электростанции, произошедшая в 1986 году, привела к загрязнению обширных сельскохозяйственных территорий, что, в свою очередь, повлекло за собой изменение их правового статуса, направленное на защиту населения от последствий аварии. Наиболее пострадавшими российскими регионами стали Калужская, Орловская, Тульская и Брянская области.

Территории с плотностью загрязнения $^{137}Cs$ свыше 1480 кБк/м$^2$ из-за невыполнимости безопасных условий труда для механизаторов и полеводов, а также невозможности получения продукции растениеводства и животноводства, отвечающей санитарным нормам, были полностью выведены из землепользования[1,2]. Такие земли расположены в пяти юго-западных районах Брянской области РФ и составляют более 5,5 % от всех сельскохозяйственных угодий данных районов[3] [1, 2].

Часть отчужденных земель находится вблизи жилых населенных пунктов, в связи с чем несанкционированно используется населением как сенокосы и пастбища, реже — под пашню. Ряд этих территорий располагается на землях, перспективных для крупных агрохолдингов, и вызывает интерес с точки зрения возвращения в хозяйственное пользование. Эта тенденция указывает на необходимость тщательного обследования данных территорий, а также проведения комплекса мероприятий для их дальнейшего возвращения в хозяйственный оборот [3, 4].

Для принятия решений по возвращению земель в хозяйственный оборот требуется получать актуальную информацию об их современном состоянии. В этих целях важно как собрать свежие данные мониторинга, так и проанализировать массив более ранних данных для выявления различных закономерностей. Поскольку весь накопленный массив данных, включая актуальную информацию, является пространственно распределенным, для работы с ними использовались такие специализированные программные продукты, как геоинформационные системы (ГИС). В качестве рабочей среды для выполнения поставленных задач была выбрана ГИС NextGIS. Она обладает всем необходимым функционалом и позволяет не только обрабатывать массивы информации, но и представлять полученные результаты в веб-среде для сторонних лиц.

Цель работы заключалась в использовании базы пространственно-временных данных и ее информационного насыщения для оценки современного радиоэкологического состояния сельскохозяйственных земель Брянской области, временно выведенных из оборота. Для реализации этого проекта были поставлены следующие задачи:

- актуализация и систематизация информации об исследуемых территориях;
- анализ информации, собранной в базе пространственно-временных геоданных, для оценки современного радиоэкологического состояния отчужденных сельскохозяйственных угодий Брянской области.

1 О режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС: Постановление Правительства РФ от 25 декабря 1992 г. № 1008. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&link_id=0&nd=102020633 (дата обращения: 10.06.2025).

2 О социальной защите граждан, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС: Закон РФ от 15 мая 1991 г. № 1244-1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://mintrud.gov.ru/docs/laws/88 (дата обращения: 10.06.2025).

3 Воробьев Г.Т., Гучанов Д.Е., Маркина З.Н. и др. Радиоактивное загрязнение почв Брянской области. Брянск: Грани, 1994. 177 с.

# 2 Материалы и методы

В среде NextGIS существует ряд способов хранения пространственно распределенных данных. Сюда относятся как свободные форматы (Shape, TIFF и др.), хранящие информацию различной направленности в разных файлах, так и базы данных, позволяющие хранить всю собранную информацию в одном файле.

Для хранения собранных пространственно-временных геоданных была создана база пространственно-временных геоданных радиологического состояния отчужденных сельскохозяйственных угодий Брянской области в формате GeoPackage[4]. Это современный встроенный формат в среде продуктов NextGIS, который позволяет хранить растры, векторы и даже стили и проекты NextGIS QGIS. Его структура представляет собой SQLite — базу данных, которая состоит только из одного файла с расширением .gpkg, где все данные представлены в виде таблиц различного содержания. Геометрия в нем хранится в формате WKB, векторные данные в привычном виде: отдельный слой — отдельный тип геометрии, как в большинстве форматов.

Наполнение созданной базы геоданных проходило в несколько этапов. На первом этапе уточнялось местоположение исследуемых территорий, поскольку их границы неоднократно менялись (либо было невозможно идентифицировать границы полей на космоснимках). Для этого была выполнена пространственная привязка отсканированного картографического материала к космоснимкам. В качестве источника информации о расположении отчужденных участков выступали картосхемы находящихся на этих землях сельхозпредприятий. Геопривязка проводилась посредством выбора ключевых опорных точек с известными координатами (координаты населенных пунктов, перекрестков дорог), а также элементов ландшафта на плане, позволяющих наиболее точно выделить их на космоснимке (изгибы дорог, рек и др.). Затем производилась трансформация растра различными методами. Лучший результат показал метод тонкостенного сплайна. После наложения выполнялись оцифровка сельскохозяйственных угодий, представление их в виде векторной модели данных (полигоны) с определением номера на плане, типа землепользования (пашни, сенокосы, пастбища) и занесение информации в атрибуты слоя (рис. 1).

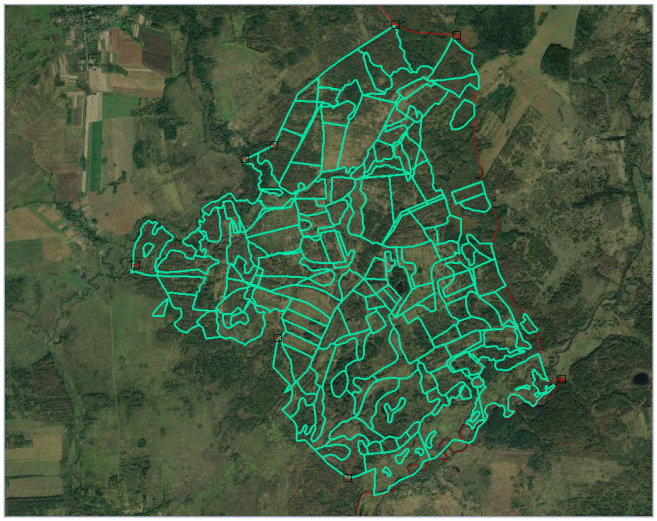
**Рис. 1**
Наложение на космоснимок и оцифровка схемы хозяйства имени Кирова Красногорского района

**Fig. 1**
Superimposing on a satellite image and digitizing of the scheme of the Kirov farm, Krasnogorsk district

**Наложение на космоснимок схемы хозяйства /**
Superimposing of the scheme of the farm on a satellite image



**Оцифровка схемы хозяйства /**
Digitizing the scheme of the farm



4 Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025623621 Российская Федерация. База пространственно-временных геоданных радиоактивно загрязненных сельхозугодий Брянской области, временно выведенных из оборота после аварии на ЧАЭС: заявл. 24.07.2025: опубл. 03.09.2025 / В.В. Кречетников, И.Е. Титов, О.А. Шубина; заявитель Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

На следующем этапе работ был проведен анализ современного культуртехнического состояния исследуемых территорий. После аварии на Чернобыльской АЭС изъятие этих сельскохозяйственных земель из оборота способствовало их зарастанию древесно-кустарниковой растительностью. Для выявления залесенных и закустаренных участков проводился анализ, основанный на измерении отражательной способности растительности в зависимости от ее сомкнутости и содержания хлорофилла в листе — нормализованного разностного вегетационного индекса (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), который определяется как отношение разности значений отражения в ближней инфракрасной области спектра и значений отражения в красной области спектра к их сумме [5–7]. Для выполнения поставленной задачи были взяты многоканальные снимки исследуемой территории среднего разрешения Landsat 5 TM (30 м) в следующих спектральных каналах: синем (0,45–0,52 мкм), зеленом (0,52–0,60 мкм), красном (0,63–0,69 мкм), ближнем инфракрасном (0,76–0,90 мкм), коротковолновом инфракрасном (1,55–1,75 мкм). После этого определялись значения NDVI (рис. 2).

На основе анализа были выделены участки, классифицированные по различиям в значениях рассчитанного индекса NDVI. Зарастание древесно-кустарниковой растительностью было выявлено по объединениям со значениями индекса свыше 0,3 (что соответствует высокой биомассе) сложной неправильной формы в границах участка, выраженных в оттенках красного цвета (рис. 2, объект 1). Земли, занятые под посевами, определялись по участкам со значениями индекса ниже 0,3, с ярко выраженными границами и правильной геометрии, обозначенным на карте светло-красными цветами (рис. 2, объект 2). Открытые почвы имеют светло-голубой цвет (рис. 2, объект 3). В темно-красном цвете на разновременных изображениях обозначены лесные участки с насаждениями естественного происхождения (рис. 2, объект 4). Объекты гидрографии (вода) идентифицировались по анализу комбинированного изображения в каналах 3, 4, 5, где выделялись синим цветом.

Данные о радиоэкологической обстановке и почвенных характеристиках были получены из Электронного реестра земель с высокими уровнями радиоактивного загрязнения (ЭЛРЕВУЗ)[5]. ЭЛРЕВУЗ создан с использованием системы управления базами данных Access и содержит информацию об административно-хозяйственной характеристике и структуре землепользования территорий сельскохозяйственных предприятий до их вывода из оборота, характеристиках

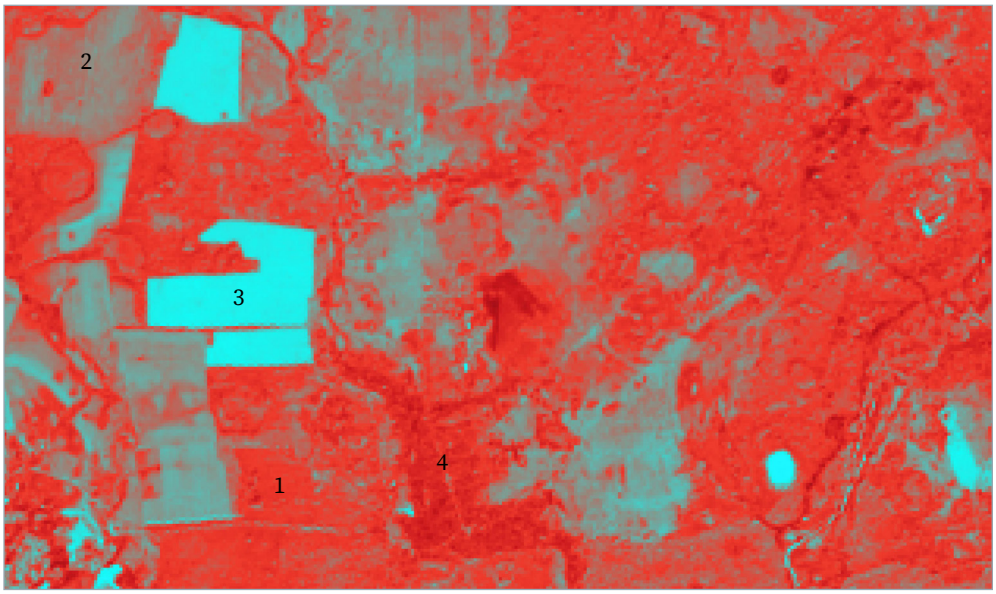



**Рис. 2**
Исследуемая территория в синтезе ближнего инфракрасного, красного и зеленого каналов на разновременных изображениях Landsat 5 TM

**Fig. 2**
The area under study in the NIR – Red – Green channel synthesis on Landsat 5 TM images at different times

**Условные обозначения**

1 участок с древесно-кустарниковой растительностью
2 участок, занятый под посевы
3 участок с открытой почвой
4 лесной участок с насаждениями естественного происхождения

5 Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2016620529 Российская Федерация. Электронный реестр земель с высокими уровнями радиоактивного загрязнения (ЭЛРЕВУЗ): № 2016620220: заявл. 09.03.2016: опубл. 26.04.2016 / О.А. Шубина, И.Е. Титов; заявитель Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии.

почвенного покрова и современной радиационной обстановке на этих землях. В качестве источников информации использовались данные, собранные Брянским филиалом Агрохимической службы России, а также результаты, полученные в ходе проведения ряда обследований этих территорий при реализации Программы совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС.

Информация о реабилитационных мероприятиях добавлялась в виде информационных таблиц для дальнейшего использования при оценке возможности возвращения исследуемых территорий в хозяйственный оборот. Данные были собраны как из справочных материалов научных статей, так и из программного продукта ReSCA, который представляет собой систему поддержки принятия решений и содержит информацию о радиологической эффективности, стоимости внедрения, периоде действия и приемлемости для населения того или иного мероприятия[6] [8–12]. Данные о коэффициентах перехода $^{137}$Cs в продукцию сельского хозяйства были получены из публикаций МАГАТЭ[7], а также по результатам анализа изменения коэффициентов перехода $^{137}$Cs в продукцию растениеводства, кормопроизводства и животноводства в районах Брянской области, пострадавших после аварии на Чернобыльской АЭС [13–15].

# 3 Результаты и обсуждение

База данных[8] объединяет пространственно-временную информацию для отчужденных сельскохозяйственных угодий 22 хозяйств юго-западных районов Брянской области. Вся собранная информация была проанализирована и представлена в виде таблиц, хранящихся в общем файле GeoPackage. Они содержат атрибутивные и пространственные данные, представленные в виде векторных карт различной детализации и тематической направленности. Для проведения оценки современного радиоэкологического состояния сельскохозяйственных земель Брянской области, временно выведенных из оборота, были созданы следующие таблицы: «Информация о реабилитационных мероприятиях», «Административно-хозяйственная характеристика», «Границы хозяйств», «Коэффициенты перехода $^{137}$Cs в продукцию сельского хозяйства», «Почвенные характеристики», «Радиологическое состояние». Механизм применения базы для анализа и представления данных приведен на рис. 3. Аналитика данных проводится в программной среде NextGIS QGIS, представляющей собой пользовательское настольное ГИС-приложение. Результатами являются тематические карты как в веб-представлении (рис. 4), так и в печатном виде.

Созданную базу данных можно редактировать не только с использованием ГИС-приложений, но и средствами работы с базами данных SQL (*англ.* Structured Query Language), такими как SQLiteStudio. В этом случае структура созданной базы данных будет представлять собой набор системных таблиц, хранящих информацию о стиле слоев, их геометрии и системных настройках, а также пользовательских таблиц, содержащих атрибутивные данные.

6 Алексахин Р.М., Санжарова Н.И., Быданова В.В. Агроэкологический мониторинг, технологии и информационно-методическое обеспечение сельскохозяйственного производства на техногенно загрязненных территориях. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2013. 170 с.

7 Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2009. 625 p.

8 Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025623621 Российская Федерация. База пространственно-временных геоданных радиоактивно загрязненных сельхозугодий Брянской области, временно выведенных из оборота после аварии на ЧАЭС: заявл. 24.07.2025: опубл. 03.09.2025 / В.В. Кречетников, И.Е. Титов, О.А. Шубина; заявитель Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

**Рис. 3**
Механизм пополнения и применения базы пространственно-временных геоданных

**Fig. 3**
Mechanism for updating and applying the spatial-temporal geodata base

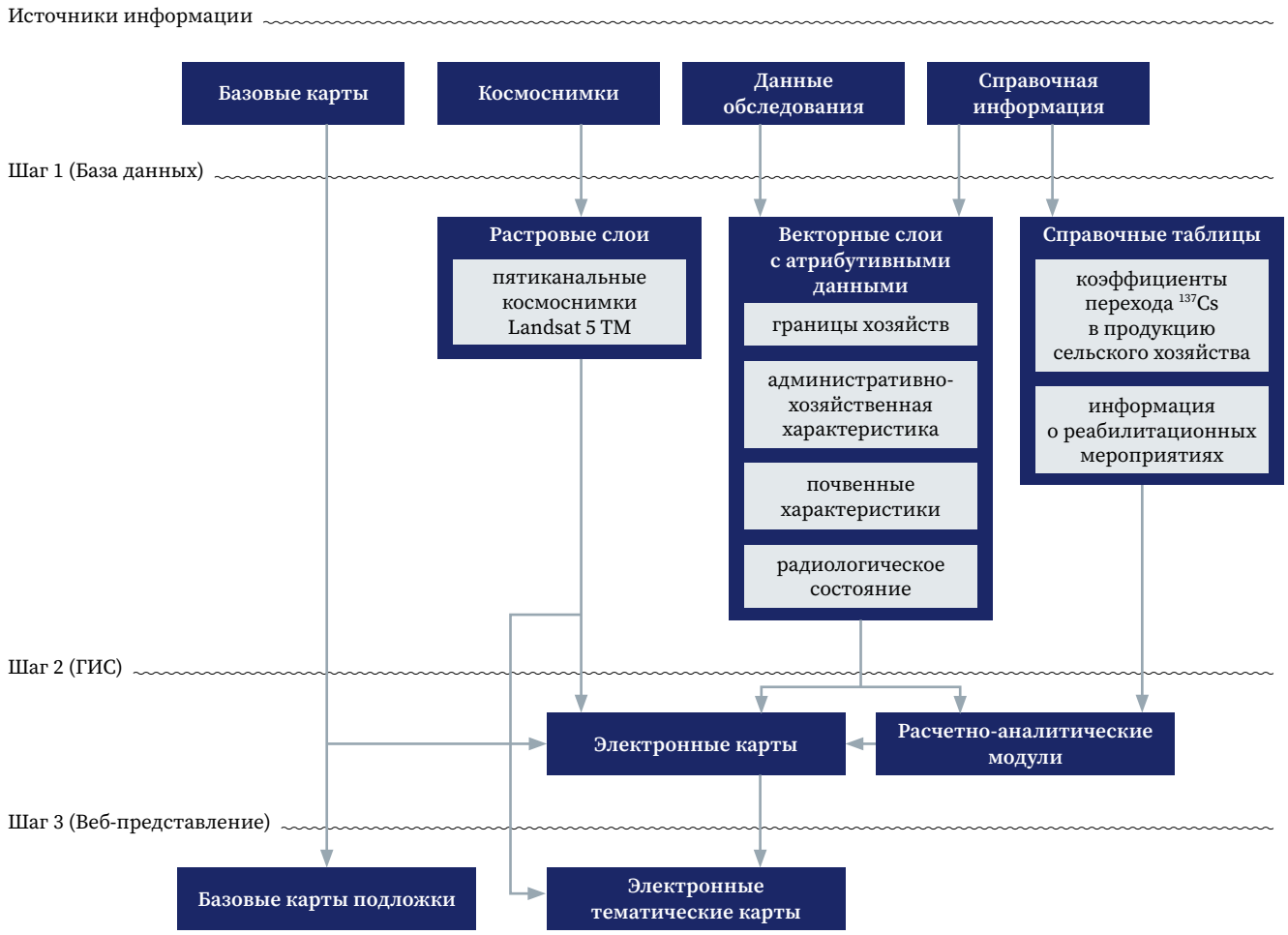



**Рис. 4**
Отображение добавленных в базу данных атрибутов

**Fig. 4**
Display of attributes added to the database

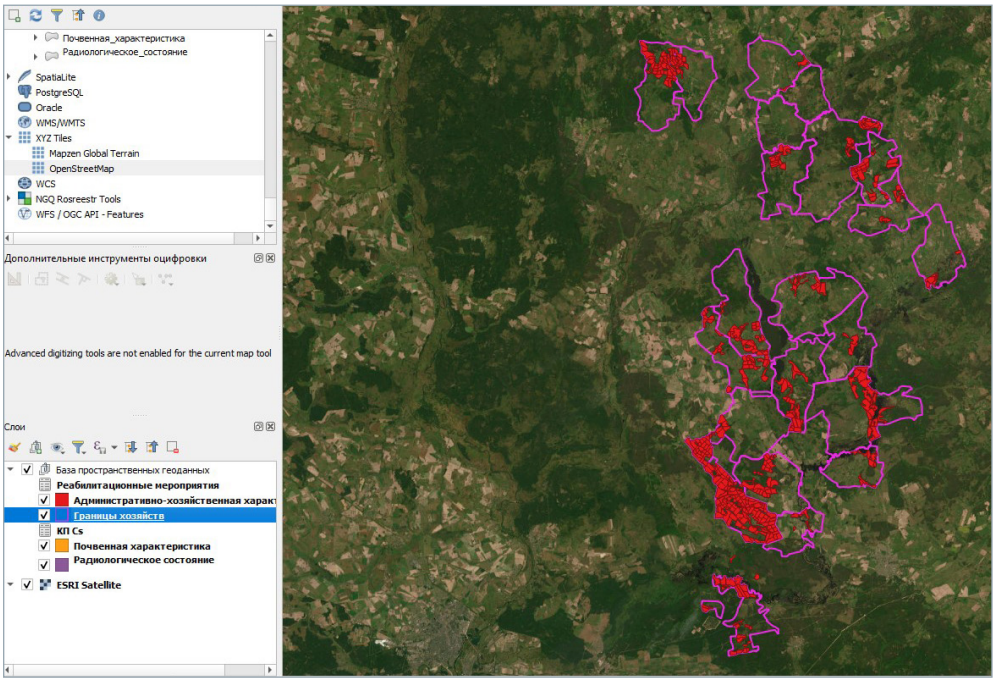


**Рис. 5**

Динамика площадей выведенных из оборота земель Брянской области с плотностью загрязнения $^{137}$Cs свыше 1480 кБк/м$^2$

**Fig. 5**

Dynamics of Bryansk region areas withdrawn from circulation with $^{137}$Cs contamination density exceeding 1480 kBq/m$^2$

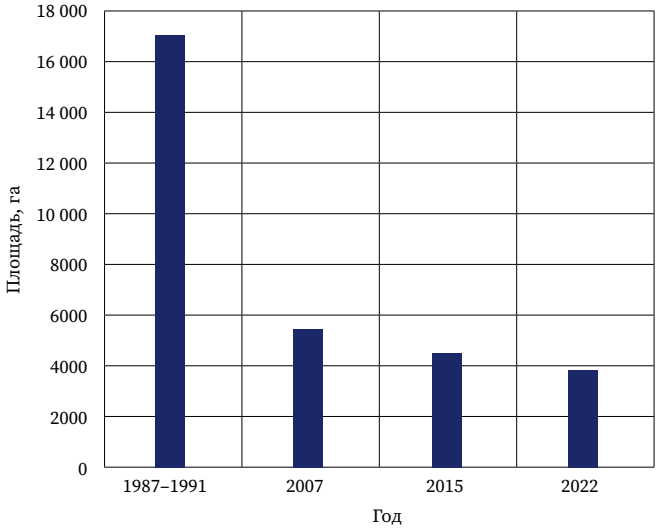
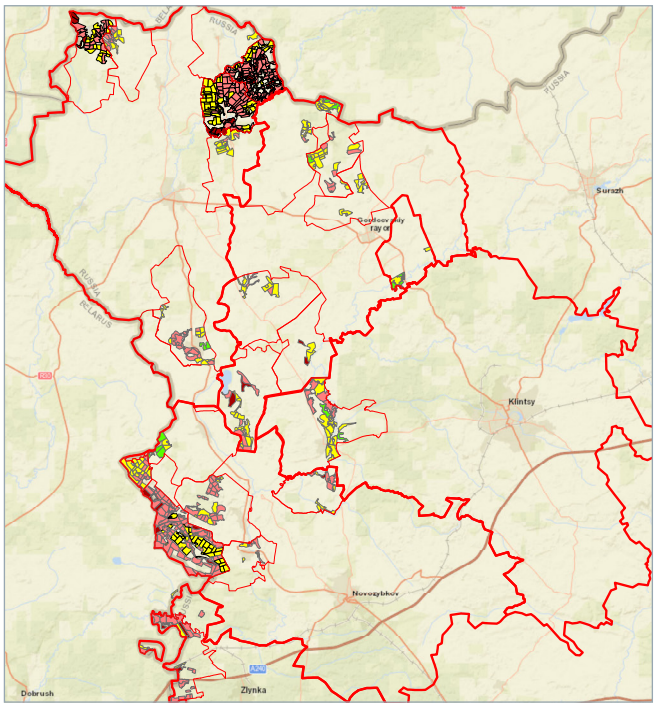



**Рис. 6**

Карта-схема загрязнения $^{137}$Cs сельскохозяйственных угодий Брянской области, временно выведенных из землепользования (2022 г.)

**Fig. 6**

Map of $^{137}$Cs contamination of Bryansk region temporarily abandoned agricultural land (2022)




**Условные обозначения**

$^{137}$Cs, кБк/м$^2$

- 0–37
- 37–185
- 185–555
- 555–1480
- > 1480

База пространственно-временных геоданных радиологического состояния отчужденных сельскохозяйственных угодий Брянской области состоит из 3049 записей, хранящихся в 31 таблице, 9 из которых являются системными и содержат 36 записей. Сведения о геометрии объектов представлены 1494 записями и хранятся в 4 виртуальных и 12 физических таблицах с геометрией. Вся атрибутивная информация собрана в 6 пользовательских таблицах и содержит 1519 записей.

Анализ собранной в базе данных информации, в частности анализ современной радиологической ситуации, указывает на возможность возвращения в хозяйственный оборот по радиологическому принципу большей части земель, временно выведенных из землепользования. Тенденция по изменению качественного состояния земель проиллюстрирована на рис. 5, где показана динамика уменьшения площадей выведенных из оборота земель с плотностью загрязнения $^{137}$Cs свыше 1480 кБк/м$^2$. Результаты анализа были отражены на различных тематических картах, применяемых для пространственного анализа (рис. 6).

Оценка современной структуры землепользования отчужденных сельскохозяйственных угодий позволила выделить среди них такие виды, как:

- пашня (в основном выращиваются зерновые культуры, несмотря на ограничения по использованию);
- пастбища и сенокосы (после коренного улучшения, проведенного в предыдущие годы, эти угодья полностью используются для выпаса животных и покоса);
- участки под паром, с многолетними сеяными травами (после коренного улучшения с посевом многолетних трав в прошлые годы угодья не используются, за редким исключением в виде выпаса домашнего скота);
- залежь (произошло зарастание бывших сельхозугодий сорной растительностью, кустарником и мелколесьем, начался процесс восстановления в травостое видов, характерных для естественных лугов);
- участки естественных суходольных и пойменных лугов (используются для выпаса домашнего скота).

Оценка культуртехнического состояния угодий, временно выведенных из землепользования, показала, что степень зарастания кустарником и мелколесьем варьируется от 30 до 80 % в зависимости от хозяйства. Значительная часть пастбищ закочкарена, идет активный процесс развития сорной растительности. За прошедшее время также произошло изменение видового состава луговой и пастбищной растительности, что повлекло за собой значительное снижение продуктивности травостоев и, как следствие, снижение уровня почвенного плодородия.

Анализ информации о почвенных характеристиках сельскохозяйственных угодий, выведенных

из землепользования, позволил выделить 4 основных типа почвенного покрова, наиболее часто встречаемых на исследуемых территориях: дерново-подзолистые, дерново-глеевые, болотные перегнойно-торфяные и пойменные аллювиально-слоистые почвы. Практически все перечисленные почвы характеризуются низким содержанием гумуса (0,5–2,5 %) и питательных веществ, таких как подвижный фосфор (3,8–10 мг / 100 г почвы) и калий (3,5–12,4 мг / 100 г почвы), кислой реакцией почвенного раствора (pH 4,2–5), невысокой степенью насыщенности основаниями (31–69 %). Исключением являются болотные перегнойно-торфяные почвы, встречающиеся в основном лишь в долинах рек и болотистых низинах и используемые местным населением для выпаса домашнего скота. Отмеченные свойства обуславливают относительно низкую фиксацию $^{137}$Cs, что приводит к его высокой подвижности в почве и в системе «почва — растение».

На следующем этапе работ планируется создать на языке Python расчетно-аналитические модули для платформы NextGIS QGIS, которые будут обрабатывать собранные показатели и осуществлять оценку содержания $^{137}$Cs в продукции растениеводства и кормопроизводства, а также давать прогнозные оценки радиологической обстановки и рекомендации по проведению реабилитационных мероприятий при их необходимости. Полученная в ходе анализа информация будет отображаться в виде электронных тематических карт. Они будут иметь веб-представление с использованием инструментария NextGIS Web. Публичное представление данных будет реализовано различными блоками облачного хранилища с отдельными веб-картами, разделенными по тематике.

## 4 Выводы

Для преодоления последствий чернобыльской катастрофы необходим постепенный переход от послеаварийных реабилитационных мероприятий к созданию условий для безопасной жизнедеятельности населения. Реализация такой стратегии на отчужденных территориях требует решения ряда задач по их возврату в хозяйственный оборот. Для этого необходимо оперировать актуальной информацией о современном радиоэкологическом и культуртехническом состоянии исследуемых земель, характеристиках почвенного покрова.

Требуемая информация была объединена в созданной базе пространственно-временных геоданных радиологического состояния отчужденных сельскохозяйственных угодий Брянской области и применялась с целью анализа состояния исследуемой территории в разные моменты времени. Для пространственного анализа и выявления закономерностей, а также для представления собранных данных были созданы тематические электронные карты, отражающие различные показатели. Общий анализ собранной информации показал, что большая часть исследуемых земель на сегодняшний день может быть возвращена в хозяйственный оборот. Культуртехническое состояние угодий ухудшается с каждым годом, доля площадей, подвергшихся закустариванию, залесению и закочкариванию, местами достигает 80 %. Агрохимические показатели почв обуславливают низкое плодородие и относительно низкую фиксацию $^{137}$Cs и, как следствие, его высокую подвижность в почве и в системе «почва — растение».

Собранные и организованные пространственно-временные данные послужат основой для создания проектируемых расчетно-аналитических модулей, на основе которых будут проведены прогнозные оценки. Полученные результаты будут представлены в облачной среде веб-ГИС, реализованной на базе платформы NextGIS.

**благодарности** Исследование выполнено по государственному заданию № 5ф.6.4 «Создание научных основ мониторинга радиоактивно загрязненных территорий и разработка технологий возврата земель, подвергшихся радиационному воздействию, в сельскохозяйственный оборот».

## библиография


1. Панов А.В., Ратников А.Н., Свириденко Д.Г. и др. Реабилитация сельскохозяйственных земель при масштабном радиоактивном загрязнении (к 35-летию аварии на Чернобыльской АЭС) // Российская сельскохозяйственная наука. 2021. № 3. С. 46–50. DOI:10.31857/S2500262721030091.
2. Панов А.В. Возвращение радиоактивно загрязненных территорий к нормальной жизнедеятельности: современные проблемы и пути решения (к 35-летию аварии на Чернобыльской АЭС) // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2021. № 1. С. 5–13. DOI:10.25016/2541-7487-2021-0-1-05-13.
3. Гераськин С.А., Фесенко С.В. Действие аварийных выбросов Чернобыльской АЭС на биоту // Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий / под ред. Н.И. Санжаровой, С.В. Фесенко. М.: РАН, 2018. С. 60–90.
4. Санжарова Н.И., Кузнецов В.К., Исамов Н.Н. и др. Экспериментальные исследования поведения радионуклидов в аграрных экосистемах после аварии на ЧАЭС // Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий / под ред. Н.И. Санжаровой, С.В. Фесенко. М.: РАН, 2018. С. 188–202.
5. Ничипорович З.А., Радевич Е.А. Опыт использования NDVI-индекса для мониторинга сельскохозяйственных земель Полесья по данным спектрозональной космосъемки Ikonos // Журнал прикладной спектроскопии. 2012. Т. 79, № 4. С. 681–684.
6. Терехин Э.А. Оценка сезонных значений вегетационного индекса (NDVI) для детектирования и анализа состояния посевов сельскохозяйственных культур // Исследование Земли из космоса. 2015. № 1. С. 23–31. DOI:10.7868/S0205961415010108.
7. Лавренникова О.А., Иралиева Ю.С. Крылова А.А. и др. Мониторинг состояния посевов и оценка индекса NDVI с применением БПЛА // Международный агрокультурный журнал. 2025. Т. 8, № 2. С. 427–451. DOI:10.55186/25880209_2025_9_2_4.
8. Комаров А.А., Комаров А.А. Оценка состояния травостоя с помощью вегетационного индекса NDVI // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2018. № 51. С. 124–129.
9. Милютина Е.М., Поцепай С.Н., Анищенко Л.Н. и др. Агроэкологическая оценка комплексного применения средств химизации при возделывании яровых зерновых культур в условиях радиоактивного загрязнения почв в агроценозах: монография. Брянск: Брянский ГАУ, 2022. 238 с.
10. Санжарова Н.И., Панов А.В., Исамов Н.Н. и др. Защитные и реабилитационные мероприятия в сельском хозяйстве: к 30-летию аварии на ЧАЭС // Агрохимический вестник. 2016. № 2. С. 5–9.
11. Свириденко Д.Г., Петров К.В., Арышева С.П. и др. Сравнительная оценка эффективности различных гуминовых препаратов при возделывании ячменя в условиях радиоактивного загрязнения почв // Вестник аграрной науки. 2023. № 2 (101). С. 57–67. DOI:10.17238/issn2587-666X.2023.2.57.
12. Белоус Н.М., Чесалин С.Ф., Шаповалов В.Ф. и др. Научно обоснованное применение минерального удобрения при производстве кормов в условиях радиоактивного загрязнения: монография. М.: Русайнс, 2024. 272 с.
13. Fesenko S.V., Prudnikov P.V., Emlyutina E.S., et al. Dynamics of $^{137}$Cs Transfer Factors to Agricultural Products after the Chernobyl Accident: Cereals, Potatoes, and Vegetables // Biology Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2023. Vol. 50. P. 3355–3366. DOI:10.1134/S1062359023120105.
14. Ласько Т.В., Карпенко А.Ф. Параметры перехода $^{137}$Cs в основные кормовые культуры в отдаленный постчернобыльский период // Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. 2021. № 24-1. С. 182–190.
15. Подоляк А.Г., Крук А.В., Карпенко А.Ф. Экологизация растениеводства на территории радиоактивного загрязнения. Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2020. 334 с.

**авторы** **Кречетников Виктор Владимирович**
АО «Прорыв», Москва, Россия
0000-0002-6099-6917

**Титов Игорь Евгеньевич**
titan13_08@mail.ru
НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия
лаборатория математического моделирования и геоинформационных систем
0000-0002-5275-3229

**Шубина Ольга Андреевна**
olgashu76@gmail.com
НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия
Курчатовский комплекс радиологии и агроэкологии
канд. биол. наук
0000-0003-3055-9473

**Кречетникова Евгения Олеговна**
evg.krechet@yandex.ru
НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия
лаборатория математического моделирования и геоинформационных систем
0000-0002-3601-220

**Поступила 18.06.2025. Принята к публикации 20.02.2026. Опубликована 27.02.2026.**

UDC 004.65:504
DOI:10.30533/GiA-2026-007

CC BY

# Application of a Spatio-Temporal Geodata Base for Assessing the Current Radioecological State of Agricultural Lands in the Bryansk Region That Have Been Temporarily Withdrawn from Circulation

**Viktor V. Krechetnikov**[1] ✉, **Igor E. Titov**[2], **Olga A. Shubina**[2], **Evgeniya O. Krechetnikova**[2]

[1] Proryv JSC, Moscow, Russia
[2] Kurchatov Institute, Moscow, Russia
✉ viktor.krechetnikov@mail.ru

**citation** Krechetnikov VV, Titov IE, Shubina OA, Krechetnikova EO. Application of a Spatio-Temporal Geodata Base for Assessing the Current Radioecological State of Agricultural Lands in the Bryansk Region That Have Been Temporarily Withdrawn from Circulation. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2026;70(1): 128–140. DOI:10.30533/GiA-2026-007.

**keywords** alienated territory, spatial data, Chernobyl accident, radioactive contamination, rehabilitation technology, database

**abstract** The article describes the development of the structure and content of the spatiotemporal database of the radiological state of alienated agricultural lands in the Bryansk region. An overview of the sources of information for filling the database is given, as well as the rationale for choosing the storage format for the collected information. As part of the work on filling the spatial database, 3049 records were added to 31 tables. Some information is presented in tables without spatial reference. The main part of the data characterizing various properties of real areas is presented in the form of attributes of previously created and updated vector objects. The use of the spatiotemporal database allows obtaining up-to-date, complete and reliable information on the state of alienated lands in the Bryansk region. An analysis of the collected information on various indicators of the state of the studied lands is carried out. In the future, based on the database, it is planned to create calculation and analytical modules for predictive assessments of the radiological situation and recommendations for rehabilitation measures, if necessary. The collected and organized spatial data will later be built into web mapping services for public access.

**acknowledgements** This work was carried out under state assignment No. 5f.6.4 “Creation of scientific foundations for monitoring radioactively contaminated territories and development of technologies for returning lands exposed to radiation to agricultural use”.

## references


1. Panov AV, Ratnikov AN, Sviridenko DG, et al. Reabilitaciya sel'skohozyajstvennyh zemel' pri masshtabnom radioaktivnom zagryaznenii (k 35-letiyu avarii na Chernobyl'skoj AES) [Agricultural Land Remediation During Large Scale Radioactive Contamination (to the 35th Anniversary of the Chernobyl NPP Accident)]. ***Russian Agricultural Sciences.*** 2021;3: 46–50. (In Russian). DOI:10.31857/S2500262721030091.
2. Panov AV. Vozvrashchenie radioaktivno zagryaznennyh territorij k normal'noj zhiznedeyatel'nosti: sovremennye problemy i puti resheniya (k 35-letiyu avarii na Chernobyl'skoj AES) [Returning Radioactively Contaminated Territories to Normal Life: Current Problems and Ways for Solution (35 Years after the Chernobyl NPP Accident)]. ***Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations***. 2021;1: 5–13. (In Russian). DOI:10.25016/2541-7487-2021-0-1-05-13.
3. Geras'kin SA, Fesenko SV. Deistvie avariinykh vybrosov Chernobyl'skoi AES na biotu [The Effect of Chernobyl Nuclear Power Plant Emergency Emissions on Biota]. ***Radioecological Consequences of the Chernobyl Accident: Biological Effects, Migration, Rehabilitation of Contaminated Areas***. Sanzharova NI, Fesenko SV. (eds.). Moscow: RAS; 2018: 60–90. (In Russian).
4. Sanzharova NI, Kuznetsov VK, Isamov NN, et al. Eksperimental'nye issledovaniya povedeniya radionuklidov v agrarnykh ekosistemakh posle avarii na CHAES [Experimental Studies of the Behavior of Radionuclides in Agricultural Ecosystems after the Chernobyl Accident]. ***Radioecological Consequences of the Chernobyl Accident: Biological Effects, Migration, Rehabilitation of Contaminated Areas***. Sanzharova NI, Fesenko SV. (eds.). Moscow: RAS; 2018: 188–202. (In Russian).
5. Nichiporovich ZA, Radevich EA. Opyt ispol'zovaniya NDVI-indeksa dlya monitoringa sel'skokhozyaistvennykh zemel' Poles'ya po dannym spektrozonal'noi kosmos"emki Ikonos [Experience Using the Normalized Difference Vegetation Index for Monitoring Polesye Agricultural Land Based on Multispectral Ikonos Satellite Imaging Data]. ***Journal of Applied Spectroscopy.*** 2012;79(4): 681–684. (In Russian).
6. Terekhin EA. Otsenka sezonnykh znachenii vegetatsionnogo indeksa (NDVI) dlya detektirovaniya i analiza sostoyaniya posevov sel'skokhozyaistvennykh kul'tur [Estimation of Seasonal NDVI Values for the Detection and Analysis of Crop Conditions]. ***Earth Research from Space.*** 2015;1: 23–31. (In Russian). DOI:10.7868/S0205961415010108.
7. Lavrennikova OA, Iralieva YuS, Krylova AA, et al. Monitoring sostoyaniya posevov i ocenka indeksa NDVI s primeneniem BPLA [The Use of GIS Technologies in Management Land Resources of the Farm]. ***International Agricultural Journal.*** 2025;2: 427–451. DOI:10.55186/25880209_2025_9_2_4.
8. Komarov AA, Komarov AA. Ocenka sostoyaniya travostoya s pomoshch'yu vegetacionnogo indeksa NDVI [Assessment of the State of the Herbage Using the NDVI]. ***Izvestiya Saint Petersburg State Agrarian University.*** 2018;51: 124–129. (In Russian).
9. Milyutina EM, Potsepai SN, Anishchenko LN, et al. ***Agroehkologicheskaya otsenka kompleksnogo primeneniya sredstv khimizatsii pri vozdelyvanii yarovykh zernovykh kul'tur v usloviyakh radioaktivnogo zagryazneniya pochv v agrotsenozakh*** [Agroecological Assessment of the Complex Application of Chemicals in the Cultivation of Spring Grain Crops in Conditions of Radioactive Soil Contamination in Agrocenoses] [monograph]. Bryansk: Bryansk SAU; 2022. 238 p. (In Russian).
10. Sanzharova NI, Panov AV, Isamov NN, et al. Zashchitnye i reabilitatsionnye meropriyatiya v sel'skom khozyaistve: k 30-letiyu avarii na CHAEHS [Protective and Rehabilitation Countermeasures in Agriculture: to the 30th Anniversary of the Chernobyl NPP Accident]. ***Agrochemical Herald.*** 2016;2: 5–9. (In Russian).
11. Sviridenko DG, Petrov KV, Arysheva SP, et al. Sravnitel'naya otsenka effektivnosti razlichnykh guminovykh preparatov pri vozdelyvanii yachmenya v usloviyakh radioaktivnogo zagryazneniya pochv [Comparative Assessment of the Effectiveness of Various Humic Preparations in the Cultivation of Barley in Conditions of Radioactive Soil Contamination]. ***Bulletin of Agrarian Science.*** 2023;2(101): 57–67. (In Russian). DOI:10.17238/issn2587-666X.2023.2.57.
12. Belous NM, Chesalin SF, Shapovalov VF, et al. ***Nauchno obosnovannoe primenenie mineral'nogo udobreniya pri proizvodstve kormov v usloviyakh radioaktivnogo zagryazneniya*** [Scientifically Proven Use of Mineral Fertilizers in Feed Production under Conditions of Radioactive Contamination] [monograph]. Moscow: Rusains; 2024. 272 p. (In Russian).

13. Fesenko SV, Prudnikov PV, Emlyutina ES, et al. Dynamics of $^{137}$Cs Transfer Factors to Agricultural Products after the Chernobyl Accident: Cereals, Potatoes, and Vegetables. ***Biology Bulletin of the Russian Academy of Sciences.*** 2023;50: 3355–3366. DOI:10.1134/S1062359023120105.
14. Las'ko TV, Karpenko AF. Parametry perekhoda $^{137}$Cs v osnovnye kormovye kul'tury v otdalennyj postchernobyl'skij period [Parameters of the Transition of $^{137}$Cs to the Main Fodder Crops in the Remote Post-Chernobyl Period]. ***Actual Problems of Intensive Development of Animal Husbandry.*** 2021;24-1: 182–190. (In Russian).
15. Podolyak AG, Kruk AV, Karpenko AF. ***Ekologizaciya rastenievodstva na territorii radioaktivnogo zagryazneniya*** [Ecologization of Crop Production in the Territory of Radioactive Contamination]. Gomel: GGU im. F. Skoriny; 2020. 334 p.

## authors

**Viktor V. Krechetnikov**
Proryv JSC, Moscow, Russia
0000-0002-6099-6917

**Igor E. Titov**
titan13_08@mail.ru
Kurchatov Institute, Moscow, Russia
Laboratory of Mathematical Modeling and Geoinformation Systems
0000-0002-5275-3229

**Olga A. Shubina**
olgashu76@gmail.com
Kurchatov Institute, Moscow, Russia
Kurchatov Complex of Radiology and Agroecology for Scientific Work
PhD in Biology
0000-0003-3055-9473

**Evgeniya O. Krechetnikova**
evg.krechet@yandex.ru
Kurchatov Institute, Moscow, Russia
Laboratory of Mathematical Modeling and Geoinformation Systems
0000-0002-3601-2201

**Submitted: June 18, 2025. Accepted: February 20, 2026. Published: February 27, 2026.**

УДК 553.9:528.087-047.36
DOI:10.30533/GiA-2026-009

CC BY

# Модель комплексного мониторинга элементов геотехнической системы на лицензионных участках нефтегазоконденсатных месторождений

**С.В. Дроздов**[1] ✉, **Л.Н. Гилёва**[1]

[1] Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, Омск, Россия
✉ dsv_55@mail.ru

**цитирование** Дроздов С.В., Гилёва Л.Н. Модель комплексного мониторинга элементов геотехнической системы на лицензионных участках нефтегазоконденсатных месторождений // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 1. С. 141–156. DOI:10.30533/GiA-2026-009.

**ключевые слова** показатель мониторинга, природная среда, геотехническая система, модель комплексного мониторинга, опасный геологический процесс, технологический объект, геопространственная модель, техногенное воздействие, нефтегазоконденсатное месторождение

**аннотация** Безопасная эксплуатация и бесперебойная работа объектов, организующих технологический процесс добычи, переработки и транспортировки углеводородного сырья, обеспечивает энергетическую, экологическую и экономическую стабильность государства. Критические трансформации природных, техногенных и природно-техногенных компонентов окружающей среды способны провоцировать нарушения в работе производственных объектов, возникновение аварий, экологических катастроф, сопровождающихся несчастными случаями, материальным ущербом, длительными перебоями в работе. В связи с этим возникает необходимость в сохранении ресурсного потенциала природной среды и в организации рационального природопользования в границах лицензионных участков углеводородных месторождений. Бесконфликтное сосуществование компонентов природной среды и объектов технологического процесса нефте- и газодобычи заключается в снижении уровня взаимного негативного воздействия и может быть достигнуто за счет проведения комплексного мониторинга земель лицензионных участков углеводородных месторождений. В статье описаны применяемые методы проведения комплексного мониторинга, дано понятие геотехнической системы и представлен комплекс показателей

для мониторинга ее компонентов. Предлагаются мероприятия по совершенствованию методических положений сбора и обработки данных дистанционного зондирования Земли с применением беспилотных воздушных судов в соответствии с задачами и особенностями проведения мониторинговых исследований. Сформирована модель комплексного мониторинга геотехнической системы.

# 1 Введение

В мировом масштабе Россия обладает значительными запасами углеводородного сырья, большая часть которых сосредоточена в регионах со сложными природно-климатическими и физико-географическими характеристиками. Сюда относятся территории Ямало-Ненецкого и Ханты-Мансийского автономных округов и Республики Саха (Якутия), в обозримом будущем рассматриваемой как центр нефтяной и газовой промышленности на востоке России. Промышленное освоение таких земель создает агрессивную среду внутри геотехнической системы, которая в данном контексте рассматривается как совокупность непрерывно взаимодействующих природно-технических элементов.

К числу природно-технических элементов геотехнической системы относятся:

1) природная среда (гидрология, почва, растительность);
2) геологическая среда (верхние слои горного пространства);
3) антропогенная среда (промышленные и хозяйственные объекты).

Мониторинг элементов геотехнической системы обеспечивает их устойчивое состояние, особенно в границах лицензионных участков объектов нефтегазового комплекса. Конструктивным способом решения задач развития и обустройства лицензионных участков является комплексный подход к мониторингу состояния всех элементов геотехнической системы и обеспечению их безопасности и надежности на всех жизненных циклах нефтегазоконденсатных месторождений (НГКМ) [1].

Разработанная модель комплексного мониторинга на лицензионных участках НГКМ позволяет оценить состояние территории, в частности земель и ландшафтов [2]. Модель включает визуально-оптические наблюдения с применением беспилотных летательных аппаратов, геологические (геокриологические и геогидрологические) и геодезические наблюдения.

Апробирование разработанной модели позволяет сделать вывод, что аэрофотосъемка (АФС) является наиболее эффективным методом проведения визуально-оптических наблюдений и получения первичной информации о состоянии геотехнической системы, а также дает надежную топографическую основу (в виде ортофотопланов и цифровых моделей рельефа) для картирования текущего состояния и прогнозирования развития негативных процессов и явлений, воздействующих на все входящие в данную систему элементы.

По мнению авторов, разработанная модель (в состав которой входят подсистемы планирования работ; сбора и обработки полученных в результате визуально-оптических, геокриологических и геодезических наблюдений данных; сопоставительного анализа с данными прошлых лет; накопления и хранения данных) обеспечивает всесторонний и комплексный подход к мониторингу геотехнической системы на лицензионных участках НГКМ, а также способствует эффективному решению задач комплексного мониторинга на всех этапах его проведения с помощью современных методов и технологий ведения работ.

# 2 Материалы и методы

## 2.1 Общие положения о комплексном мониторинге

Комплексный мониторинг геотехнической системы представляет собой технологию, позволяющую контролировать, прогнозировать и регулировать состояние всех входящих в нее элементов в границах отведенных земель, а также в зонах влияния технологических объектов посредством регулярных визуально-оптических, геокриологических и геодезических наблюдений [3, 4]. Цель разработки и внедрения комплексного мониторинга во все жизненные циклы НГКМ заключается в снижении рисков и предупреждении возникновений техногенных аварий и экологических катастроф вследствие негативных процессов и явлений как природного, так и антропогенного характера.

В рамках комплексного мониторинга проводятся регулярные наблюдения за развитием опасных геологических процессов, среди которых распространены эрозия, выветривание, солифлюкция, карстовые формы, заболачивание, обводнение и нарушение стока. Показателями этих процессов являются площадь распространения, пространственное положение, удаленность от объектов промышленной и хозяйственной инфраструктуры и динамика развития [5, 6].

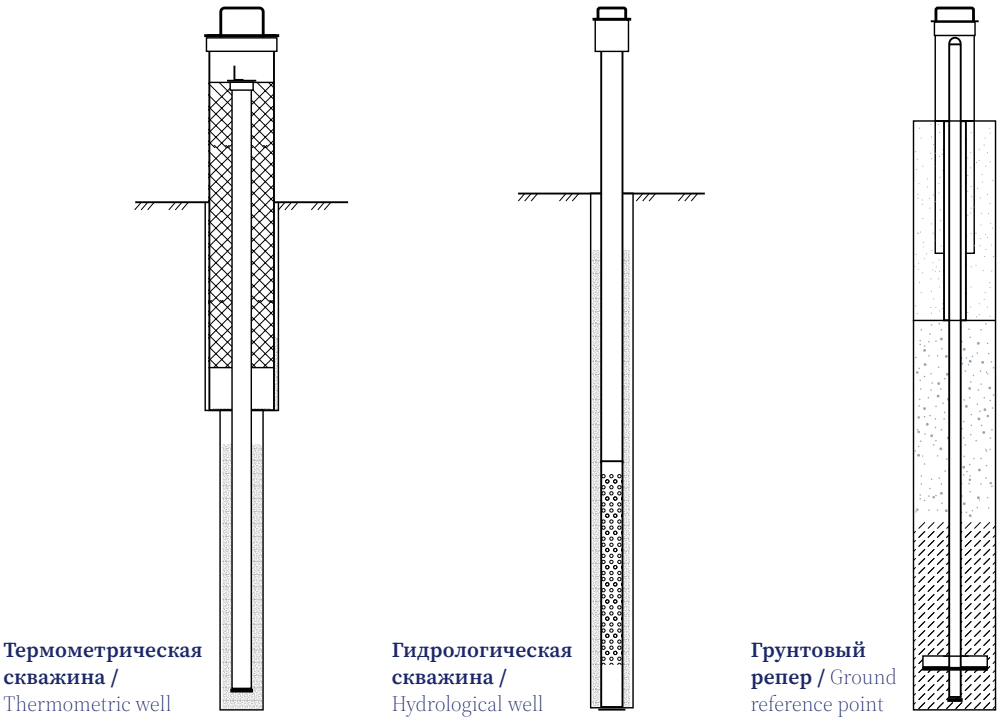
Геологические и геодезические наблюдения за компонентами геологической и антропогенной среды выполняются посредством ручного опроса специальным образом оборудованных точек инженерного обеспечения:

- термометрических скважин (контроль температурного режима верхних слоев геологического пространства и грунтов оснований инженерных сооружений в зоне влияния промышленных объектов);
- гидрогеологических скважин (контроль гидрогеологического состояния геологического пространства и грунтов оснований инженерных сооружений);
- грунтовых реперов и деформационных марок (контроль пространственного положения и геометрических характеристик инженерно-технических объектов, опасных геологических процессов и компонентов природной среды).

Конструктивные элементы геотехнической сети для проведения геокриологических и геодезических наблюдений в рамках комплексного мониторинга представлены на рис. 1.

**Рис. 1**
Конструктивные элементы геотехнической сети

**Fig. 1**
Structural components of the geotechnical monitoring network



Топографической основой для картирования наблюдаемых процессов и явлений чаще всего являются цифровые материалы инженерных изысканий, в лучшем случае актуализированные по материалам исполнительных геодезических съемок, в то время как во многих отраслях хозяйственной деятельности внедряются более надежные и эффективные технологии для получения геопространственных данных — наземное лазерное сканирование, воздушное лазерное сканирование и АФС с пилотируемых или беспилотных летательных аппаратов [7–9]. В большей степени это связано с отсутствием разработанных и утвержденных методик проведения мониторинговых исследований по материалам АФС, а также с нехваткой квалифицированного персонала.

Наиболее популярной и доступной на сегодняшний день технологией дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является АФС с использованием беспилотных воздушных судов (БВС). Этот метод имеет ряд неоспоримых преимуществ, среди которых стоит отметить возможность проведения работ с относительно небольших высот в непосредственной близости от объекта, что способствует получению снимков с очень высоким разрешением (до 1 см/пикс) и среднеквадратической ошибкой привязки к местности, примерно равной значению проекции пикселя на местности в используемой системе координат. Это обеспечивает высокий уровень детализации цифровых моделей геопространства при фотограмметрической обработке материалов АФС. Весомым преимуществом также является оперативность получения большого объема данных за относительно небольшой промежуток времени: до 20 га за 20 мин. [10–13].

## 2.2 Современные методы получения геопространственных данных и их внедрение в технологию проведения комплексного мониторинга

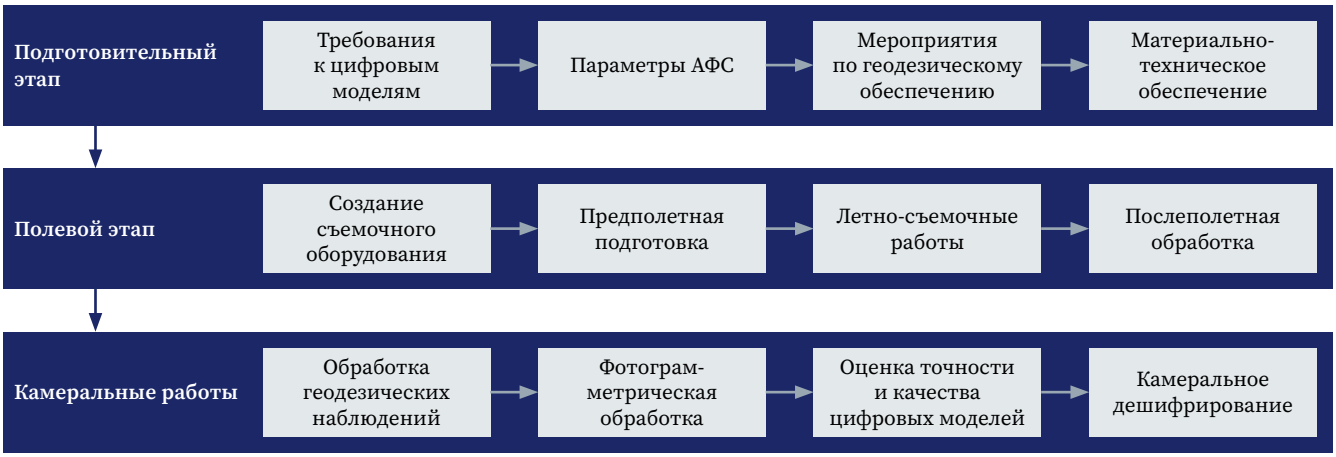
Вопросы мониторинга земель (в том числе с применением БВС) и его методические основы рассмотрены в многочисленных теоретических и прикладных исследованиях и научных работах ученых-практиков: А.А. Алябьева, В.В. Беленко, Л.В. Быкова, А.В. Дубровского, И.Г. Журкина, А.П. Карпика, А.В. Комиссарова, П.И. Костина, А.С. Костюка, В.А. Малинникова, А.П. Сизова, Т.А. Хлебниковой, Д.А. Шаповалова, Х.К. Ямбаева и др.

Разработкой и внедрением современных технологий, технических и программных средств в различные отрасли хозяйственной деятельности для решения широкого круга задач в настоящее время занимается большое количество как отечественных, так и зарубежных научно-исследовательских организаций и промышленных предприятий. Среди российских производителей БВС стоит отметить компанию «Геоскан» (Санкт-Петербург) и группу компаний «Беспилотные системы» (Ижевск).

Технологическая схема сбора и обработки данных ДЗЗ с применением БВС представлена на рис. 2.

**Рис. 2**
Технологическая схема сбора и обработки данных ДЗЗ

**Fig. 2**
Workflow for acquisition and processing of Earth observation data



Технологическая схема сбора и обработки данных ДЗЗ с применением БВС включает три основных этапа: подготовительный, полевой и камеральный. Однако для проведения аэрофотосъемочных работ с целью комплексного мониторинга требуется более детальная проработка методики сбора и обработки данных на основе наблюдаемых компонентов, показателей и других факторов, которые могут меняться в промежутке между циклами.

Технология проведения АФС с применением БВС в рамках режимных наблюдений мониторинга предполагает следующее:

- требования, предъявляемые к цифровым моделям геопространства, основаны на компонентах и показателях мониторинга, имеющейся информации о типе местности и других данных, отражающих ситуацию в границах проведения работ;
- расчет параметров АФС выполняется в автоматическом режиме, средствами специализированного программного обеспечения (ПО), совместимого с системой управления беспилотного летательного аппарата, в соответствии с максимально возможными требованиями к качеству фотографического материала и безопасности проведения аэрофотосъемочных работ;
- съемочное обоснование (опорные знаки и контрольные точки) для геодезического обеспечения АФС разработано сообразно условиям его регулярного и долгосрочного использования (конструкция, разметы и размещение съемочного обоснования должны обеспечивать его сохранность и уверенное распознавание на аэрофотоснимках);
- характеристики используемого воздушного судна соответствуют минимально необходимым, но достаточным техническим требованиям;
- бесперебойный контроль выполнения полетного задания обеспечивается за счет размещения наземной станции управления на максимально возвышенном месте в зоне проведения работ;
- место взлета / посадки воздушного судна соответствует требованиям безаварийного проведения летно-съемочных работ и регламентированным пунктам инструкции по эксплуатации;
- процесс камеральной обработки автоматизирован за счет мобилизации имеющихся инструментов ПО и технических возможностей рабочей станции.

Для того чтобы повысить эффективность проведения комплексного мониторинга геотехнической системы и входящих в его состав аэрофотосъемочных работ, а также работ, требующих регулярного геодезического обеспечения, на территориях лицензионных участков НГКМ необходимо создавать сети постоянно действующих базовых станций глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС).

Учет вышеобозначенных факторов в процессе комплексного мониторинга позволит значительно повысить производительность, точность и качество геопространственных данных для выявления присутствия и картирования негативных процессов и явлений, воздействующих на геотехническую систему и провоцирующих возникновение техногенных аварий и экологических катастроф на лицензионных участках НГКМ, и при этом исключить ошибки, вызванные погрешностями пунктов имеющейся геодезической сети, а также некоторые ошибки, связанные с человеческим фактором.

Разработанная авторами модель комплексного мониторинга элементов геотехнической системы на лицензионных участках НГКМ представлена на рис. 3. Она включает следующие *подсистемы:*

- разработки технического проекта и планирования работ по каждому отдельно взятому объекту мониторинга;
- сбора комплексных данных о техническом состоянии инженерных сооружений и негативных процессах как природного, так и антропогенного происхождения;
- обработки геодезических измерений, фотограмметрической обработки материалов визуально-оптических наблюдений и данных, полученных в процессе опроса сетей геотехнического мониторинга;




**Рис. 3**
Модель комплексного мониторинга элементов геотехнической системы

**Fig. 3**
Integrated monitoring model for geotechnical system components

- анализа текущего состояния обследованных компонентов окружающей среды и инженерных сооружений, оценки динамики трансформации;
- накопления, хранения данных и управления ими, организации прав доступа в соответствии с установленным уровнем.

Предложенная модель имеет хороший уровень детализации всех входящих в нее подсистем.

Среди преимуществ разработанной модели комплексного мониторинга элементов геотехнической системы можно отметить следующие:

1. Подсистема планирования работ использует все доступные источники информации, в том числе Единую цифровую платформу «Национальная система пространственных данных» (НСПД)[1].
2. Подсистема сбора данных включает проведение визуально-оптических (методами ДЗЗ с использованием БВС), геологических и геодезических наблюдений.
3. Подсистема обработки данных предусматривает обновление:
   - информации о топографо-геодезической изученности района работ;
   - топографической основы на основе цифровых моделей геопространства и ортофотопланов;
   - информации о состоянии геологической среды и горном пространстве.
4. Подсистема анализа текущих и абсолютных показателей включает оценку динамики наблюдаемых процессов и явлений, протекающих в геотехнической системе.
5. Подсистема накопления и хранения полученных результатов, организованная в виде внутреннего централизованного локального ресурса с индивидуальным подходом к предоставлению прав доступа для пользователей, с обновлением на регулярной основе, использует разные источники данных: материалы проведенных мониторинговых исследований, метеорологические станции, открытые и коммерческие геопорталы с материалами космических съемок, материалы вновь проводимых инженерных изысканий и др.

Полученные при проведении комплексного мониторинга геотехнической системы материалы могут быть использованы для локального повышения разрешительных характеристик данных ДЗЗ в НСПД, а также для обновления семантической информации об инженерно-технических сооружениях и коммуникациях, о занимаемых ими землях и других объектах геотехнической системы в границах лицензионных участков нефтегазового комплекса.

1 Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Национальная система пространственных данных»: Постановление Правительства РФ от 1 декабря 2021 г. № 2148. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202112070014 (дата обращения: 19.12.2024).

# 3 Результаты

Апробация разработанной модели выполнена в рамках экспериментальных исследований. В качестве объекта был выбран земельный участок, расположенный на юго-западе Ленского улуса (района) Республики Саха (Якутия) на территории действующего НГКМ. В границах рассматриваемого земельного участка находятся объекты трубопроводной сети, требующие регулярных комплексных мониторинговых наблюдений.

В подсистеме планирования был выполнен сбор информации о геодезической изученности участка проведения работ, материалов инженерно-геологических и геодезических изысканий, данных ранее проведенных опросов геотехнической сети и пр. На основании полученной информации определены виды и объемы работ, требования к цифровым моделям геопространства, параметрам АФС, комплекс материально-технического оснащения и составлен график проведения работ.

Согласно информации, полученной в НСПД, в районе проведения работ (рис. 4) расположено 5 пунктов государственной геодезической сети (ГГС), 3 особо охраняемых природных территории, 15 зон с особыми условиями использования территорий, 27 инженерных сетей.

**Рис. 4**
Район проведения работ

**Fig. 4**
The research land area



В отношении объекта исследования выполнялись визуально-оптические, геодезические, геологические, геокриологические (температура грунтов), гидрологические (уровень грунтовых вод) наблюдения. Работы по комплексному мониторингу были выполнены на участке площадью 150 га, в границах которого находятся: 5 пунктов ГГС, 6 грунтовых реперов, 11 деформационных марок, 15 термометрических и 12 гидрологических скважин. Комплекс материально-технического оснащения включает: БВС Geoscan Gemini, комплект спутникового геодезического оборудования Fora 20SE, цифровой нивелир Leica, трассоискатель RD8000, комплект для термометрических наблюдений (термокосы и контроллер), гидрологическую рулетку.

Для определения показателей комплексного мониторинга элементов геотехнической системы на лицензионных участках НГКМ были проанализированы нормативно-технические и правовые акты, регулирующие мониторинг подсистем окружающей среды, и проектная документация, разработанная для каждой системы мониторинга [14, 15].

Показатели комплексного мониторинга элементов геотехнической системы и периодичность наблюдений представлены в табл. 1.

Подсистема наблюдений включала геодезические, визуально-оптические и геологические наблюдения.

В процессе геодезических наблюдений были обследованы пункты ГГС, выполнены контрольные наблюдения, между ближайшими двумя пунктами ГГС

**Таблица 1**
Показатели комплексного мониторинга элементов геотехнической системы

**Table 1**
Integrated monitoring indicators for geotechnical system components

| Среда | Компонент мониторинга | Цель | Показатели | Периодичность |
|---|---|---|---|---|
| Природная | **Земля** | Оценка текущего состояния земель, выявление изменений, их оценка, прогноз, предотвращение и устранение последствий от негативных влияний | Загрязненные / захламленные | Ежегодно в бесснежный период |
| | | | Нарушение / изменение | |
| | | | Динамика развития | |
| | **Растительный покров** | Анализ санитарного состояния лесов, контроль рубок и санитарных зон для управления защитой лесов и обеспечения их безопасности | Состояние растительности | Ежегодно в весенне-летний период |
| | | | Таксационные характеристики | |
| | | | Незаконная деятельность | |
| | **Водные объекты** | Оценка негативного влияния на водные ресурсы, разработка мер по предотвращению последствий, оценка эффективности охраны водных объектов | Урез воды | Ежегодно в летний или осенний период |
| | | | Густота эрозионной сети | |
| | | | Залуженные участки | |
| Геологическая | **Геокриологические условия** | Комплексная оценка текущих температурных, гидрологических, физико-механических и прочих характеристик многолетнемерзлых пород | Температурное состояние грунтов | Два раза в год |
| | | | Гидрологическое состояние грунтов | |
| | **Опасные геологические процессы** | Выявление присутствия и оценка динамики развития негативных процессов и явлений в геологической среде | Описание процесса | Один раз в год после снеготаяния до активной вегетации |
| | | | Скорость развития процесса | |
| | | | Площадь поражения | |
| | | | Геометрические характеристики | |
| | | | Пространственное расположение относительно инженерно-технических сооружений и их частей | |
| Антропогенная | **Промышленные объекты** | Комплексная оценка промышленного освоения территории лицензионных участков и состояния компонентов антропогенной среды для предотвращения возникновения техногенных аварий и экологических катастроф | Техническое состояние | Два раза в год: в период максимального оттаивания грунтов (сентябрь) и в период максимального промерзания грунтов (май) |
| | **Хозяйственные объекты** | | Механическое состояние | |
| | **Инженерно-технические сооружения и сети** | | Геометрические характеристики | |
| | | | Оседание | |
| | **Объекты инженерной защиты** | | Пространственное положение | |

проложен нивелирный ход IV класса, в который были включены грунтовые реперы геотехнической сети, создано съемочное обоснование для проведения визуально-оптических наблюдений (заложены опознаки).

Визуально-оптические наблюдения выполнялись методами ДЗЗ с помощью БВС мультироторного типа Gemini, разработанного российской компанией «Геоскан». Съемка проводилась на высоте 140 м в автоматическом режиме с разрешением 3 см/пиксель, в соответствии с разработанным в ПО Geoscan Planner полетным заданием (рис. 5).

В процессе геологических наблюдений был выполнен ручной опрос термометрических и гидрологических скважин. Результаты опроса были обработаны в подсистеме обработки.

В подсистеме обработки геодезических наблюдений составлены карточки обследования пунктов ГГС, выполнена обработка ходов геометрического нивелирования в ПО Credo, спутниковые наблюдения обработаны в ПО EFT Post Processing.

В подсистеме обработки данных визуально-оптических наблюдений выполнена фотограмметрическая обработка материалов ДЗЗ в ПО Agisoft Metashape Professional, получены облако точек, цифровая модель рельефа (рис. 6) и ортофотоплан.

**Рис. 5**
Полетное задание
**Fig. 5**
Flight mission plan

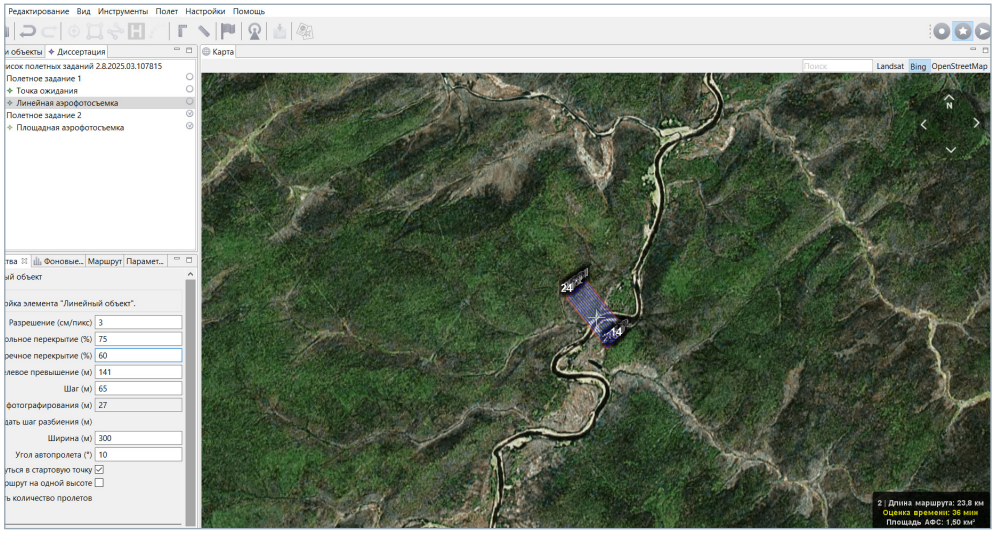
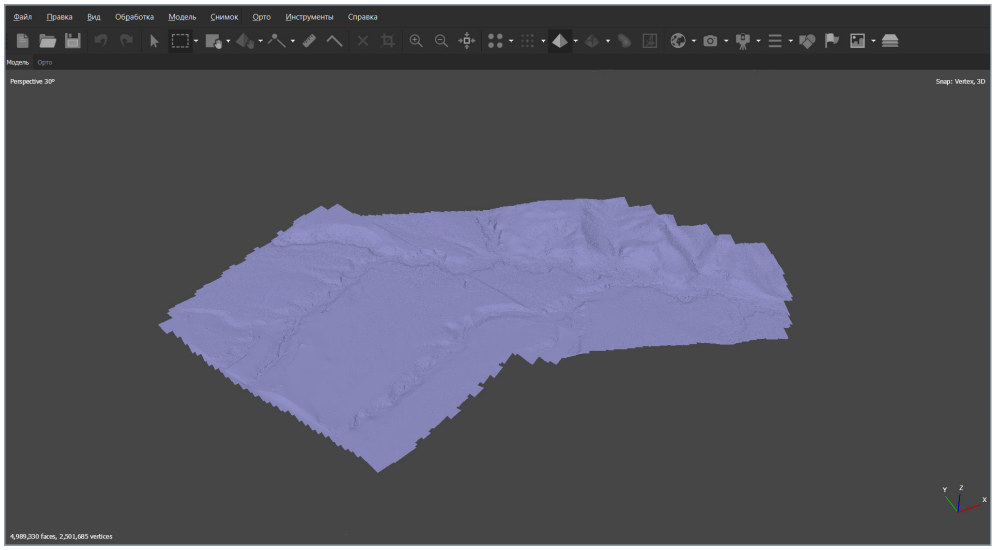



**Рис. 6**
Цифровая модель рельефа
**Fig. 6**
Digital elevation model




При обработке геологических наблюдений определены температуры на интересующих глубинах и уровень грунтовых вод, составлены графики.

При анализе геодезических наблюдений установлено, что пункты ГГС и грунтовые реперы находятся в стабильном состоянии, признаки механических нарушений не обнаружены. Анализ результатов нивелировки деформационных марок на магистральных трубопроводах не показал изменений.

Визуально-оптические наблюдения методом ДЗЗ с применением БВС впервые включены в комплексный мониторинг элементов геотехнической системы на лицензионных участках НГКМ, и полученные цифровая модель рельефа и ортофотоплан будут считаться исходными. Оценка ситуации выполнена исключительно на основании текущих показателей.

В результате анализа цифровых моделей и ортофотоплана было выявлено, что полосы отвода объектов обустройства НГКМ находятся в заросшем состоянии, что осложняет проведение последующих комплексных мониторинговых исследований, а также мероприятий по сервисному обслуживанию объектов инженерного обеспечения и может способствовать возникновению пожаров при аварийной ситуации. Выявлены места несанкционированного складирования промышленных и бытовых отходов и участки незаконных рубок.

Определено пространственное расположение опасных геологических процессов, установлены их точные геометрические характеристики.

Результаты комплексного мониторинга элементов геотехнической системы представлены в табл. 2.

**Таблица 2**
Результаты комплексного мониторинга элементов геотехнической системы

**Table 2**
Integrated monitoring results for geotechnical system components

| Показатель | Параметр | Значение, м | Визуализация |
|---|---|---|---|
| **Размыв и разрушение элемента инженерной защиты (обваловки)** | Протяженность | 50 |  |
| | Ширина | 8–10 | |
| | Глубина | 5 | |
| | Удаление от оси трассы трубопровода | 1–2 | |
| **Склоново-эрозионный процесс, сопровождающийся эрозионным врезом** | Протяженность | 50 |  |
| | Глубина | 1 | |
| | Удаленность от трассы линии электропередачи | 5–10 | |
| **Провал грунта (предположительно карстовая воронка)** | Диаметр | ≈ 8 |  |
| | Глубина | ≈ 1,5 | |
| | Удаленность от оси трубопровода | 15 | |

В границах исследуемого земельного участка в процессе непрерывного взаимодействия элементов природной и геологической среды с объектами трубопроводного транспорта возникают техногенные проявления, что приводит к развитию опасных геологических процессов. Текущее состояние и динамика этих процессов являются необходимыми контролируемыми показателями слежения за состоянием земель для геологических наблюдений в рамках комплексного мониторинга и требуют регулярных наблюдений.

В отношении объекта исследования выполнялись геокриологические и гидрогеологические наблюдения для мониторинга температурных показателей горного пространства и уровня грунтовых вод. Результаты опроса элементов сети термометрических и гидрологических скважин представлены на рис. 7, 8.

**Рис. 7**
Результаты опроса элементов сети термометрических скважин

**Fig 7**
Survey results from thermometric borehole network elements

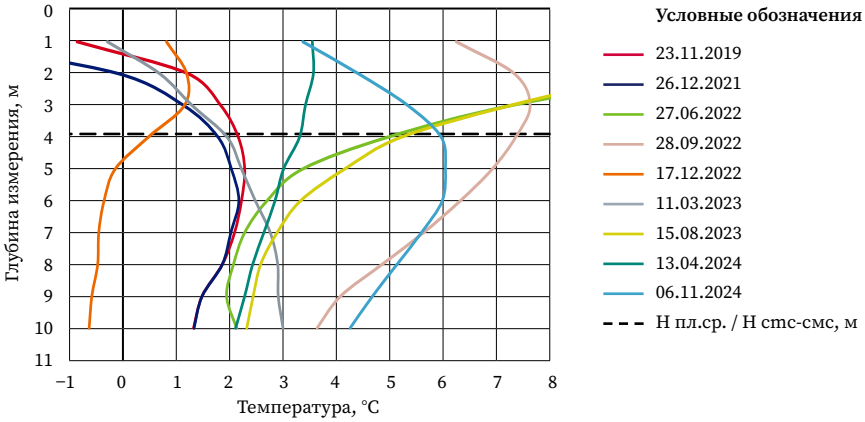
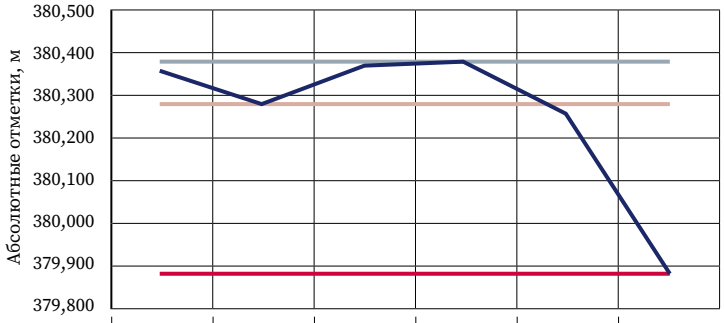



**Рис. 8**
Результаты опроса элементов сети гидрологических скважин

**Fig. 8**
Survey results from hydrological borehole network elements

**Результаты замеров уровня грунтовых вод**




| | 18.11.2019 цикл 0 | 01.07.2020 цикл 1 | 20.08.2021 цикл 2 | 29.09.2022 цикл 3 | 14.08.2023 цикл 4 | 17.06.2024 цикл 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Абс. отметка грунтовых вод | 380,361 | 380,281 | 380,371 | 380,381 | 380,261 | 379,881 |
| Абс. отметка минимального уровня | 379,881 | 379,881 | 379,881 | 379,881 | 379,881 | 379,881 |
| Абс. отметка максимального уровня | 380,381 | 380,381 | 380,381 | 380,381 | 380,381 | 380,381 |
| Абс. отметка оси трубопровода | 380,280 | 380,280 | 380,280 | 380,280 | 380,280 | 380,280 |

Анализ графиков термометрических и инженерно-гидрологических наблюдений показал, что фактическая температура грунтов в термометрических скважинах увеличивается каждый год на всех измеряемых глубинах. Уровень грунтовых вод в границах рассматриваемого участка изменяется в интервале от 5,02 до –0,27 м (выше устья гидрологической скважины). Однако геодезические наблюдения деформационных марок показали, что пространственное положение инженерных сооружений не изменилось.

В подсистеме накопления данных была выполнена каталогизация материалов геодезических, визуально-оптических и геологических наблюдений, полученных в подсистеме сбора, а также результатов, полученных в подсистеме обработки, и результатов оценки текущих и абсолютных показателей в подсистеме анализа.

# 4 Обсуждение

Выполненный комплексный мониторинг, в состав которого включены визуально-оптические наблюдения методом ДЗЗ с использованием БВС, на территории лицензионного участка носит первичный характер. В настоящее время отсутствует регламентирующая нормативно-правовая база и методика проведения комплексного мониторинга элементов геотехнической системы на лицензионных участках НГКМ. Особого нормативно-правового и методического подхода требует использование материалов ДЗЗ, которые на сегодняшний день имеют значительное преимущество с точки зрения скорости получения и достоверности. Применение методов ДЗЗ с БВС и материалов архивных космических съемок при комплексном мониторинге лицензионных участков НГКМ сегодня носит не рекомендательный, а обязательный характер. Однако требования к описанию пространственных данных не упорядочены, что вызывает неудобство их использования надзорными органами, органами исполнительной власти и недропользователями.

Предлагаемая авторами методика позволяет собрать актуальную информацию о текущем состоянии элементов геотехнической системы и динамике их трансформации. Материалы, полученные при визуально-оптических наблюдениях с применением БВС, могут быть использованы для накопления и актуализации данных ДЗЗ с высоким пространственным разрешением в НСПД. Методика обеспечивает стандартизацию процессов сбора данных с необходимой периодичностью, их обработку и хранение при комплексном мониторинге лицензионных участков НГКМ.

Геометрические характеристики опасных геологических процессов и их пространственное положение, определенные по цифровым моделям и ортофотоплану, которые составлены в результате фотограмметрической обработки полученных с помощью БВС Geoscan Gemini данных ДЗЗ, подтверждены наземными геодезическими измерениями с использованием ГНСС-приемников. Это дает повод утверждать, что метод ДЗЗ с применением БВС наиболее эффективен для оперативного получения достоверной цифровой топографической основы с высоким уровнем детализации в целях проведения комплексного геотехнического мониторинга.

# 5 Выводы

Модель комплексного мониторинга элементов геотехнической системы на лицензионных участках НГКМ обеспечивает целостность выполнения работ и взаимосвязь данных, полученных разными методами инструментальных измерений. Такая модель создает условия для комплексной оценки текущего состояния

элементов геотехнической системы, влияющих на трансформацию земель лицензионных участков НГКМ, и обеспечивает эффективное взаимодействие с заинтересованными сторонами, в том числе недропользователями, органами местного самоуправления и органами, осуществляющими природоохранную деятельность.

Таким образом, комплексный мониторинг на лицензионных участках НГКМ с использованием геопространственных данных, полученных с применением БВС, является важным условием для обеспечения рационального земле- и природопользования, особенно в регионах со сложными природно-климатическими и физико-географическими характеристиками, имеющих низкий уровень транспортной доступности.

## библиография


1. Карфидова Е.А., Макеев В.М., Сизов А.П. и др. Методы комплексной оценки геоэкологической ситуации горнопромышленных районов (на примере Соликамского городского округа) // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24, № 2. С. 46–51. DOI:10.18412/1816-0395-2020-2-46-51.
2. Сизов А.П., Черных Е.Г., Меркурьева К.Р. Совершенствование методики тематического дешифрирования космических изображений (на примере репрезентативной территории уровня муниципального образования) // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XX Международный научный конгресс: сборник материалов в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2024. Т. 4, № 1. С. 26–35. DOI:10.33764/2618-981X-2024-4-1-26-35.
3. Сизов А.П., Черных Е.Г., Щукина В.Н. и др. Интегрирующий показатель оптимальности структуры угодий как критерий для регулирования качества земель // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2023. Т. 67, № 3. С. 43–50. DOI:10.30533/GiA-2023-022.
4. Мелкий В.А., Верхотуров А.А. Технология комплексного мониторинга состояния земель и динамики природных процессов в Сахалинской области // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС». М.: Издательство Московского университета, 2017. С. 178–194. DOI:10.24057/2414-9179-2017-3-23-178-194.
5. Васютинский И.Ю., Васютинская С.И., Ознамец В.В. Использование методов прикладной статистики в кадастровых обследованиях и оценке развивающихся территорий // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2020. Т. 64, № 5. С. 592–595. DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-5-592-595.
6. Гилёва Л.Н., Дроздов С.В. Технология мониторинга опасных геологических процессов с применением беспилотных воздушных систем // Устойчивое развитие земельно-имущественного комплекса муниципального образования: землеустроительное, кадастровое и геодезическое сопровождение: сборник научных трудов по материалам VI Национальной научно-практической конференции, Омск, 21–25 ноября 2025 года. Омск: Омский ГАУ им. П.А. Столыпина, 2025. С. 306–311.
7. Комиссаров А.В. Технология мониторинга защитных сооружений магистральных нефтепроводов методами геодезии и дистанционного зондирования // Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 1. С. 65–72. DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-1-65-72.
8. Костин П.И. Таксация леса при помощи БПЛА // Вестник науки и образования. 2022. Т. 1-2, № 121. С. 58–60.
9. Гилёва Л.Н., Дроздов С.В. Использование современных технологий при выполнении мониторинговых работ // Актуальные вопросы развития землеустроительной отрасли: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной ученому, землеустроителю, профессору М.А. Сулину (в рамках празднования 120-летия ФГБОУ ВО СПбГАУ). СПб.: СПбГАУ, 2024. С. 9–13.
10. Аникеева И.А., Бабашкин Н.М., Кадничанский С.А. и др. О возможности и эффективности использования беспилотных воздушных судов при выполнении кадастровых работ // Геодезия и картография. 2018. № 8. С. 44–52. DOI:10.22389/0016-7126-2018-938-8-44-52.
11. Курков В.М., Бляхарский Д.П., Флоринский И.В. Применение беспилотной аэрофотосъемки для геоморфометрического моделирования // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2016. № 6. С. 69–77.
12. Безменов В.М., Сафин К.И. Исследование точности определения пространственных координат из обработки изображений с беспилотного

воздушного судна // Геодезия и картография. 2021. № 1. С. 45–55. DOI:10.22389/0016-7126-2021-967-l-45-55.
13. Ершов Д.В., Гаврилюк Е.А., Белова Е.И. и др. Определение породной структуры лесного участка по ортофотопланам беспилотной аэрофотосъемки // Актуальные проблемы современного лесоводства: Вторые Международные чтения памяти Г.Ф. Морозова. Симферополь: Ариал, 2020. С. 141–152.
14. Мартынова Е.В. Направления формирования и обеспечения качества Национальной системы пространственных данных // Теория и практика общественного развития. 2023. № 4 (182). С. 109–114. DOI:10.24158/tipor.2023.4.14.
15. Окмянская В.М. Разработка методики мониторинга земель особо охраняемых природных территорий с учетом региональных особенностей на примере Тюменской области: дис. … канд. техн. наук. Тюмень, 2024. 158 с.

## авторы

**Дроздов Сергей Владимирович**
ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина» (ОмГАУ), Омск, Россия
кафедра землеустройства, землеустроительный факультет

**Гилёва Лариса Николаевна**
ln.giljova@omgau.org
ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина» (ОмГАУ), Омск, Россия
кафедра землеустройства, землеустроительный факультет
канд. геогр. наук, доцент
0000-0002-2993-3280

Поступила 09.10.2025. Принята к публикации 20.02.2026. Опубликована 27.02.2026.

UDC 553.9:528.087-047.36
DOI:10.30533/GiA-2026-009

CC BY

# A Model for Integrated Monitoring of Components of Geotechnical Systems within Licensed Areas of Oil, Gas, and Condensate Fields

**Sergei V. Drozdov**[1] ✉, **Larisa N. Giljova**[1]

[1] Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, Russia
✉ dsv_55@mail.ru

**citation** Drozdov SV, Giljova LN. A Model for Integrated Monitoring of Components of Geotechnical Systems within Licensed Areas of Oil, Gas, and Condensate Fields. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2026;70(1): 141–156. DOI:10.30533/GiA-2026-009.

**keywords** monitoring indicator, natural environment, geotechnical system, integrated monitoring model, hazardous geological process, technological facility, geospatial model, man-made impact, oil and gas condensate field

**abstract** The safe operation and uninterrupted functioning of facilities that organize the technological process of extracting, processing, and transporting hydrocarbon raw materials ensure the energy, environmental, and economic stability of the state. Critical transformations of natural, technogenic, and natural-technogenic components of the environment can lead to disruptions in the operation of production facilities, accidents, and environmental disasters that result in injuries, property damage, and prolonged interruptions in operations. In this regard, there is a need to ensure the conflict-free coexistence of natural environment components with the objects of the technological process of oil and gas production, preserve the resource potential of the natural environment and organize rational environmental management within the boundaries of the licensed areas of hydrocarbon fields. Conflict-free coexistence of natural environment components with the objects of the technological process of oil and gas production is to reduce the level of mutual negative impact and can be achieved through the implementation of comprehensive monitoring of the lands of the licensed areas of hydrocarbon fields. The article describes the methods used for conducting comprehensive monitoring, defines the concept of a geotechnical system, and presents a set of indicators for monitoring its components. The article proposes measures to improve the methodological principles of collecting and processing remote sensing data using unmanned aerial vehicles, taking into account the objectives and specific features of monitoring studies. A model for comprehensive monitoring of a geotechnical system has been developed.

## references


1. Karfidova EA, Makeev VM, Sizov AP, et al. Metody kompleksnoi otsenki geoekologicheskoi situatsii gornopromyshlennykh raionov (na primere Solikamskogo gorodskogo okruga) [Methods for Integrated Assessment of the Geoecological Situation in Mining Regions (Case Study: Solikamsk Urban District)]. ***Ecology and Industry of Russia.*** 2020;24(2): 46–51. (In Russian). DOI:10.18412/1816-0395-2020-2-46-51.
2. Sizov AP, Chernykh EG, Merkuryeva KR. Sovershenstvovanie metodiki tematicheskogo deshifrirovaniya kosmicheskikh izobrazhenii (na primere reprezentativnoi territorii urovnya munitsipal'nogo obrazovaniya) [Improvement of the Methodology of Thematic Decoding of Space Images on the Example of a Representative Territory]. ***Interexpo GEO-Sibir. Proceedings of the XX International Scientific Congress.*** In 8 vols. Vol. 4. Part 1. Novosibirsk: SSUGT; 2024: 26–35. (In Russian). DOI:10.33764/2618-981X-2024-4-1-26-35.
3. Sizov AP, Chernykh EG, Shchukina VN, et al. Integriruyushchii pokazatel' optimal'nosti struktury ugodii kak kriterii dlya regulirovaniya kachestva zemel' [An Integrated Indicator of Land-Use Structure Optimality as a Criterion for Land Quality Regulation]. ***Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying.*** 2023;67(3): 43–50. (In Russian). DOI:10.30533/GiA-2023-022.
4. Melkiy VA, Verkhoturov AA. Tekhnologiya kompleksnogo monitoringa sostoyaniya zemel' i dinamiki prirodnykh protsessov v Sakhalinskoi oblasti [Technology of Comprehensive Monitoring of Land Condition and Dynamics of Natural Processes in the Sakhalin Region]. ***Proceedings of the International Conference "InterCarto. InterGIS".*** Moscow: Moscow University Press; 2017: 178–194. (In Russian). DOI:10.24057/2414-9179-2017-3-23-178-194.
5. Vasyutinsky IY, Vasyutinskaya SI, Oznamets VV. Ispol'zovanie metodov prikladnoi statistiki v kadastrovykh obsledovaniyakh i otsenke razvivayushchikhsya territorii [Application of Applied Statistics in Cadastral Surveys and Assessment of Developing Territories]. ***Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying.*** 2020;64(5): 592–595. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-5-592-595.
6. Gileva LN, Drozdov SV. Tekhnologiya monitoringa opasnykh geologicheskikh protsessov s primeneniem bespilotnykh vozdushnykh sistem [Technology of Monitoring Dangerous Geological Processes Using Unmanned Aerial Systems]. ***Sustainable Development of the Land and Property Complex of a Municipal Formation: Land Management, Cadastral, and Geodetic Support: Proceedings of the 6th National Scientific and Practical Conference, Omsk, November 21–25, 2025.*** Omsk: Omsk SAU named after P.A. Stolypin, 2025: 306–311. (In Russian).
7. Komissarov AV. Tekhnologiya monitoringa zashchitnykh sooruzhenii magistral'nykh nefteprovodov metodami geodezii i distantsionnogo zondirovaniya [Monitoring Technology for Main Oil Pipeline Protective Structures Using Geodetic and Remote Sensing Methods]. ***Vestnik SSUGT.*** 2024;29(1): 65–72. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-1-65-72.
8. Kostin PI. Taksatsiya lesa pri pomoshchi BPLA [Forest Inventory Using UAVs]. ***Vestnik Nauki i Obrazovaniya.*** 2022;1-2(121): 58–60. (In Russian).
9. Gileva LN, Drozdov SV. Ispol'zovanie sovremennykh tekhnologii pri vypolnenii monitoringovykh rabot [The Use of Modern Technologies in the Performance of Monitoring Work]. ***Actual Issues of the Development of the Land Management Industry: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the Scientist, Land Surveyor, Professor M.A. Sulin (as Part of the Celebration of the 120th Anniversary of the Saint Petersburg SAU).*** Saint Petersburg: Saint Petersburg SAU; 2024: 9–13. (In Russian).
10. Anikeeva IA, Babashkin NM, Kadnichansky SA, et al. O vozmozhnosti i effektivnosti ispol'zovaniya bespilotnykh vozdushnykh sudov pri vypolnenii kadastrovykh rabot [Feasibility and Efficiency of Using Unmanned Aerial Vehicles in Cadastral Surveys]. ***Geodesy and Cartography.*** 2018;8: 44–52. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2018-938-8-44-52.
11. Kurkov VM, Blyakharsky DP, Florinsky IV. Primenenie bespilotnoi aerofotos"emki dlya geomorfometricheskogo modelirovaniya [Application of UAV-Based Aerial Photogrammetry for Geomorphometric Modeling]. ***Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography.*** 2016;6: 69–77. (In Russian).
12. Bezmenov VM, Safin KI. Issledovanie tochnosti opredeleniya prostranstvennykh koordinat iz obrabotki izobrazhenii s bespilotnogo vozdushnogo sudna [Accuracy

Assessment of Spatial Coordinate Determination from UAV Imagery Processing]. *Geodesy and Cartography.* 2021;1: 45–55. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2021-967-l-45-55.

13. Ershov DV, Gavrilyuk EA, Belova EI, et al. Opredelenie porodnoi struktury lesnogo uchastka po ortofotoplanam bespilotnoi aerofotos"emki [Determination of Forest Stand Composition Using UAV Orthophotomaps]. *In Current Issues in Modern Forestry: Second International Morozov Readings.* Simferopol: Arial; 2020: 141–152. (In Russian).
14. Martynova EV. Napravleniya formirovaniya i obespecheniya kachestva Natsional'noi sistemy prostranstvennykh dannykh [Directions for Establishing and Ensuring the Quality of the National Spatial Data Infrastructure]. *Theory and Practice of Social Development.* 2023;4(182): 109–114. (In Russian). DOI:10.24158/tipor.2023.4.14.
15. Okmyanskaya VM. Razrabotka metodiki monitoringa zemel' osobo okhranyaemykh prirodnykh territorii s uchetom regional'nykh osobennostei na primere Tyumenskoi oblasti [Development of a Methodology for Monitoring Lands of Specially Protected Natural Territories Accounting for Regional Specifics (Case Study: Tyumen Oblast)] [dissertation]. Moscow; 2024. 158 p.

## authors

**Sergei V. Drozdov**
Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, Russia
Department of Land Management, Faculty of Land Management

**Larisa N. Giljova**
ln.giljova@omgau.org
Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, Russia
Department of Land Management, Faculty of Land Management
PhD in Geography, Associate Professor
0000-0002-2993-3280

**Submitted: October 09, 2025. Accepted: February 20, 2026. Published: February 27, 2026.**

УДК 528.4
DOI:10.30533/GiA-2026-010

CC BY

# Разработка технологической схемы создания пространственной модели территориального образования для подготовки документов территориального планирования

**Е.И. Аврунев[1] ✉, В.В. Гармаш[2], Д.В. Гоголев[1], А.В. Чернов[1]**

[1] Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия
[2] Общество с ограниченной ответственностью «СИТИ», Новосибирск, Россия
✉ avrunev-ei@yandex.ru

**цитирование** Аврунев Е.И., Гармаш В.В., Гоголев Д.В., Чернов А.В. Разработка технологической схемы создания пространственной модели территориального образования для подготовки документов территориального планирования // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 1. С. 157–173. DOI:10.30533/GiA-2026-010.

**ключевые слова** технологическая схема, документы территориального планирования, аэрофотосъемка, координирование, опознавательный знак, контрольная точка, ортофотоплан, цифровая модель местности, объект недвижимости

**аннотация** В статье рассматриваются методические и технологические подходы к решению такой актуальной научно-технической задачи, как информационное обеспечение процесса подготовки документов территориального планирования, которое в настоящее время основывается на разрозненной кадастровой и градостроительной исходной информации, представленной, как правило, в двухмерном формате. В результате информационно-аналитического обзора научно-технических публикаций по данной тематике, а также теоретических и экспериментальных исследований разработана технологическая схема создания многофункциональной пространственной модели территориального образования. В основе технологической схемы лежит интеграция сведений Единого государственного реестра недвижимости в виде кадастрового плана территории, документов территориального планирования, данных аэрофотосъемки (цифровых снимков) или результатов воздушного лазерного сканирования местности, результатов трехмерного моделирования и применения технологий искусственного интеллекта. В статье предложен алгоритм математической обработки данных геодезических измерений, выполненных для определения координат опознавательных знаков и контрольных точек, которые позволяют создать ортофотоплан местности и оценить его точность. Приведены

результаты апробации разработанной технологической схемы на примере территории села Чепош (Республика Алтай), включая этапы геодезических работ, аэрофотосъемки с использованием беспилотного летательного аппарата, фотограмметрической обработки, оценки точности полученных материалов (ортофотоплана, цифровой модели местности) и трехмерного моделирования объектов недвижимости. Показано, что реализация предложенной схемы позволяет повысить качество информационного обеспечения органов власти, эффективность использования земельных ресурсов, инвестиционную привлекательность территорий, а также обеспечивает основу для интеграции данных в рамках реализации государственной программы «Национальная система пространственных данных».

# 1 Введение

Исходя из анализа действующих и планируемых (в период с 2025 по 2030 год) государственных программ, федеральных проектов и приоритетных программ в Российской Федерации, можно сделать однозначный вывод, что основным вектором развития нашей страны является использование информационных технологий и пространственных данных в различных отраслях, в том числе в сфере государственного и муниципального управления[1].

Одной из задач, решаемых органами местного самоуправления (муниципального управления), согласно п. 3 ст. 32 Федерального закона «Об общих принципах организации местного самоуправления в единой системе публичной власти»[2], является разработка и утверждение документов по планированию, использованию и развитию территории муниципального образования (схема территориального планирования, генеральный план, правила землепользования и застройки и пр.), имеющей особое значение в условиях постоянно возрастающей урбанизационной нагрузки и дефицита земельных ресурсов городских и иных застроенных территорий. При этом основой для формирования указанных документов на сегодняшний день является разрозненная информация, представленная в двухмерном формате: сведения Единого государственного реестра недвижимости (ЕГРН) в виде кадастровых планов территории, топографические планы различных масштабов, ортофотопланы территории и существующие документы градостроительного проектирования, что не позволяет обеспечить реализацию государственных программ в области использования информационных технологий и пространственных данных.

Таким образом, проблема информационного обеспечения процесса подготовки документов территориального планирования различными видами пространственных данных обладает несомненной актуальностью.

В качестве решения можно предложить разработку укрупненной технологической схемы создания пространственной многофункциональной модели муниципального образования на примере части территории села Чепош (Республика Алтай), привязанной к системе координат, регламентированной действующим законодательством в сфере земельно-имущественных отношений. Данная модель отвечает современному уровню развития геодезического оборудования и программного обеспечения и может быть использована различными

1 Перечень государственных программ, национальных и федеральных проектов, приоритетных программ и проектов в Российской Федерации: справочная информация. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_310251/511cc833c8cca5b9a9b9031b2a6d0325fa1703c7/ (дата обращения: 24.11.2025).

2 Об общих принципах организации местного самоуправления в единой системе публичной власти: Федеральный закон от 20 марта 2025 г. № 33-ФЗ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.kremlin.ru/acts/bank/51732 (дата обращения: 24.11.2025).

заинтересованными лицами не только для планирования развития территории, но и для выполнения кадастровых работ и ведения ЕГРН.

В основе предлагаемой модели лежит интеграция сведений ЕГРН и иных информационных ресурсов и систем (в том числе негосударственных) и данных, полученных в результате выполнения аэрофотосъемки / воздушного лазерного сканирования, трехмерного (3D) моделирования объектов недвижимости и местности, геодезического контроля, а также применения технологий искусственного интеллекта.

## 2 Материалы и методы

Создание комплексных информационных моделей территории является актуальной научно-технической задачей в России и за рубежом на протяжении долгого времени [1, 2]. Ряд российских и иностранных ученых достигли значительных успехов в данной области. Среди отечественных исследователей можно назвать А.П. Карпика, предложившего термин «геопространство» и методику его пространственного описания[3] [3]; А.П. Гука, освещавшего вопросы построения реалистичных измерительных 3D-моделей объектов недвижимости и местности по данным дистанционного зондирования [4]; Е.И. Аврунева, доказавшего необходимость формирования геодезического обоснования для моделирования геопространства муниципального образования [5, 6]; Д.Н. Ветошкина, предложившего усовершенствованную модель земельно-информационной системы муниципального образования на основе пространственных информационных моделей территории [3, 7], а также Д.А. Гуру, представившего принципы трехмерной идентификации объектов недвижимости при формировании 3D-кадастра на территории Российской Федерации [8]. Иностранные ученые описали технологические, правовые и организационные особенности формирования 3D-кадастра в различных странах [9], разработали методику автоматической идентификации объектов местности при проведении лидарной съемки [10], а также предложили общую стратегию развития кадастровых систем и систем управления земельными ресурсами в зарубежных странах, которая основана на повсеместном использовании пространственных данных об объектах недвижимости и местности [11].

**Рис. 1**
Выявление земельного участка, предназначенного для строительства водного спортивного сооружения, но непригодного для данной цели

**Fig. 1**
Identification of a land plot intended for the construction of a water sports facility, but unsuitable for this purpose



В результате анализа указанных работ был сделан ряд выводов.

1. В современных условиях проектирование, планирование и использование земельных ресурсов муниципального образования должны основываться на актуальной пространственной объектно-ориентированной цифровой модели местности (ЦММ). Применение такой модели, помимо информативности, позволяет избежать ошибок на стадии двухмерного проектирования использования земель. Так, на рис. 1 показано выявление земельного участка, предназначенного для строительства водного спортивного сооружения, но непригодного для данной цели из-за перепада рельефа (перепад высот составил 37,2 м, уклон — 12°).

3 Карпик А.П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий: монография. Новосибирск: СГГА, 2004. 259 с.

2. Основой пространственной модели муниципального образования должна являться ЦММ или трехмерная полигональная модель (*англ.* 3D-mesh), базирующаяся на данных аэрофотосъемки / лидарной съемки. Применение цифровой модели рельефа (ЦМР), описывающей только геометрию земной поверхности без учета объектов недвижимости, не позволит корректно интегрировать сведения ЕГРН и информационной системы обеспечения градостроительной деятельности (ИСОГД).
3. Основными характеристиками пространственной модели муниципального образования, помимо координатного описания объектов недвижимости и местности, должны быть единство и доступность. Это положение связано с тем, что в настоящее время все данные, необходимые для градостроительной и кадастровой деятельности, разделены, обладают различной степенью актуальности и зачастую недоступны широкому кругу лиц, что ставит под сомнение качество принимаемых управленческих решений по планированию и развитию территории. Так, документы территориального планирования разрознены и дублируются на официальном сайте муниципального образования и в федеральной государственной информационной системе территориального планирования (ФГИС ТП), при этом зачастую номера и даты утверждения не соответствуют друг другу. Например, сведения ФГИС ТП о Правилах землепользования и застройки муниципального образования «Чепошское сельское поселение» относятся к 26 октября 2017 года[4], аналогичные сведения на сайте органов местного самоуправления датируются 16 мая 2025 года[5]. На наш взгляд, для эффективного планирования и управления территориями должны быть разработаны четкие регламенты обязательности передачи идентичных сведений ИСОГД о соответствующем муниципальном образовании. Под доступностью данных в рамках предлагаемого исследования понимается необходимость разработки алгоритмов равнозначного доступа всех заинтересованных лиц (муниципальные образования, проектировщики, кадастровые инженеры и другие лица) к пространственной модели. Так, на сегодняшний день кадастровым инженерам зачастую недоступна информация в векторном формате о градостроительном зонировании территории (на сайте муниципального образования публикуется растровая информация о карте градостроительного зонирования, что делает невозможным качественное выполнение кадастровых работ, например, по образованию земельных участков).
4. Пространственная модель муниципального образования должна быть сформирована в местной плоской прямоугольной системе координат (соответствует нормативным требованиям ЕГРН), в качестве высотной составляющей выступает относительная высота *H* (соответствует требованиям к формированию технических планов объектов недвижимости, дополненных 3D-моделью[6]), что позволит интегрировать получаемые данные со сведениями ЕГРН и определять пространственные характеристики объектов напрямую по модели (рис. 2).

---

4 Правила землепользования и застройки МО «Чепошское сельское поселение» // Федеральная государственная информационная система территориального планирования. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://fgistp.economy.gov.ru/lk/#/document-show/143098 (дата обращения: 24.11.2025).

5 О внесении изменений в Правила землепользования и застройки на территории МО «Чепошское сельское поселение»: решение от 16 мая 2025 г. № 102 // Официальный сайт органов местного самоуправления муниципального образования «Чепошское сельское поселение» Чемальского района Республики Алтай. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://cheposh.ru/gradostroitelstvo/pravila-zemlepolzovaniya-i-zastrojki-mo-cheposhskoe-selskoe-poselenie/2025/05/8659/ (дата обращения: 24.11.2025).

6 Об установлении формы технического плана, требований к его подготовке и состава содержащихся в нем сведений: приказ Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 15 марта 2022 г. № П/0082. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403720102/ (дата обращения: 24.11.2025).

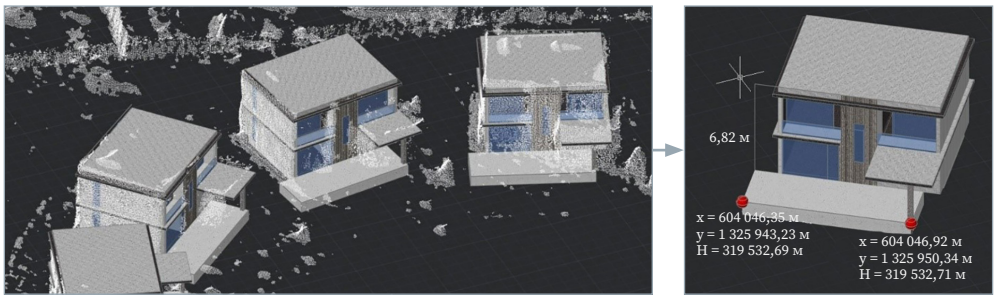



**Рис. 2**
Определение пространственных характеристик объекта недвижимости по ЦММ

**Fig. 2**
Determination of spatial characteristics of a real estate object using digital metrology

5. Пространственная модель муниципального образования должна быть интегрирована со сведениями ЕГРН, ИСОГД и федерального фонда пространственных данных (ФФПД) на единой отечественной платформе. Данное положение коррелирует с концепцией развития Национальной системы пространственных данных (НСПД) и предполагает использование государственной платформы. На сегодняшний день формирование НСПД не завершено, в связи с этим в качестве временного решения предлагается применение частных платформ. В качестве примера можно привести технологическую цифровую платформу мониторинга природно-технической среды[7] — единое геопространственное поле для анализа и визуализации разноформатных данных (рис. 3).

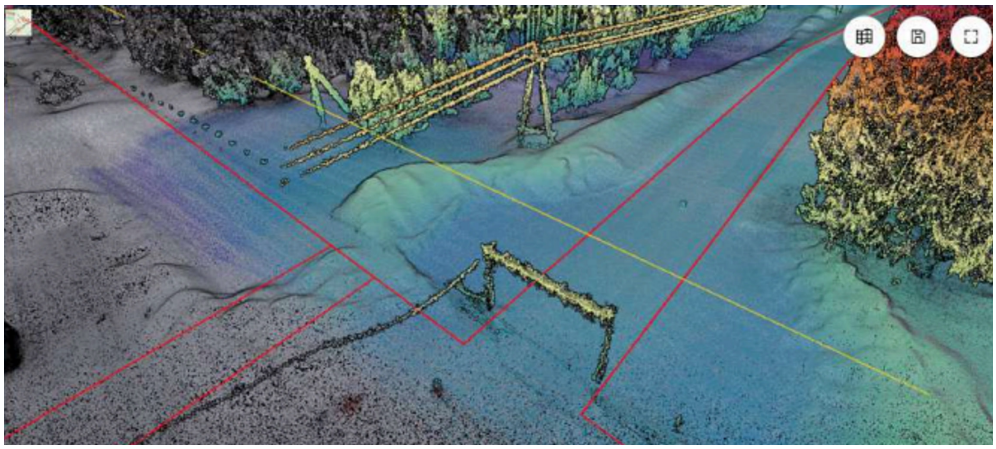


**Рис. 3**
Интеграция различных типов пространственных данных в модели муниципального образования

**Fig. 3**
Integration of different types of spatial data into municipality models

6. Для обеспечения достоверности данных об объектах недвижимости и местности перед выполнением работ по формированию пространственной модели муниципального образования в обязательном порядке должна быть создана на местности геодезическая сеть специального назначения с обязательным контролем точности.
7. Для обеспечения полноты данных пространственной информационной модели муниципального образования об объектах недвижимости на территории муниципального образования предлагается использовать базы данных негосударственных компаний (например, 2GIS), содержащие детальную актуальную информацию об организациях в зданиях, коммерческих организациях и пр., что позволит выявлять нецелевое использование земель, признаки незарегистрированных объектов капитального строительства и пр.
8. С учетом существующих нормативно-правовых актов в области обязательности использования с 2024 года технологий информационного моделирования при проектировании и строительстве ряда объектов капитального строительства (например, объектов, финансирование которых

7 Технологическая цифровая платформа мониторинга природно-технологической среды: реестровая запись № 15891 от 09.12.2022 // Реестр российского программного обеспечения. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://reestr.digital.gov.ru/reestr/1199160/ (дата обращения: 24.11.2025).

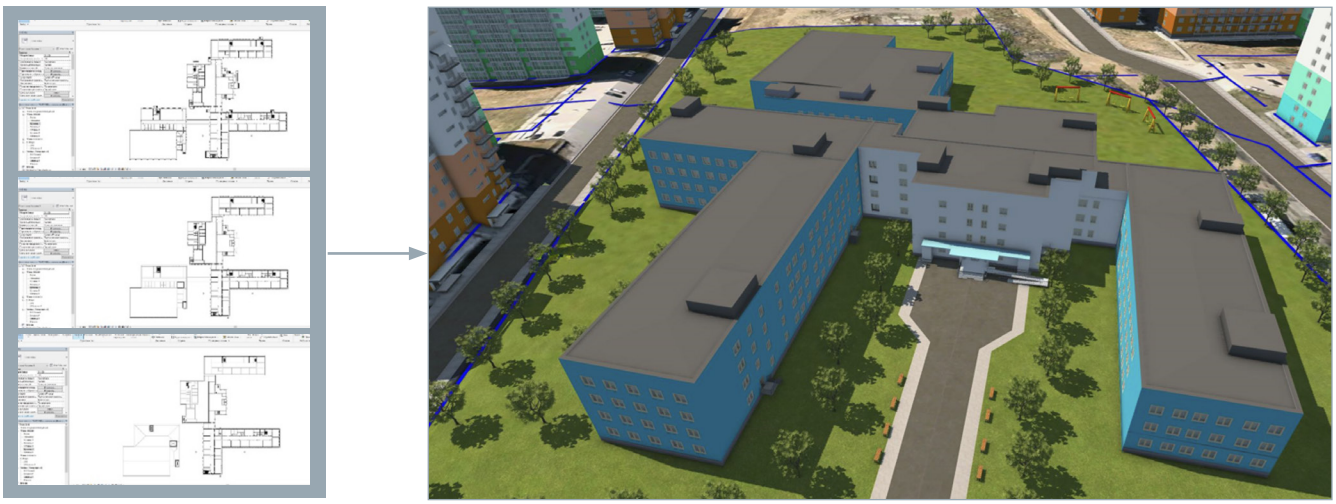


**Рис. 4**
Пример формирования информационной модели здания на основе проектной документации

**Fig. 4**
An example of the formation of an information model of a building based on design documentation

осуществляется за счет средств бюджета РФ) логичным шагом видится введение обязательности применения пространственной модели муниципального образования в качестве исходной основы для проектирования информационных моделей объектов капитального строительства.

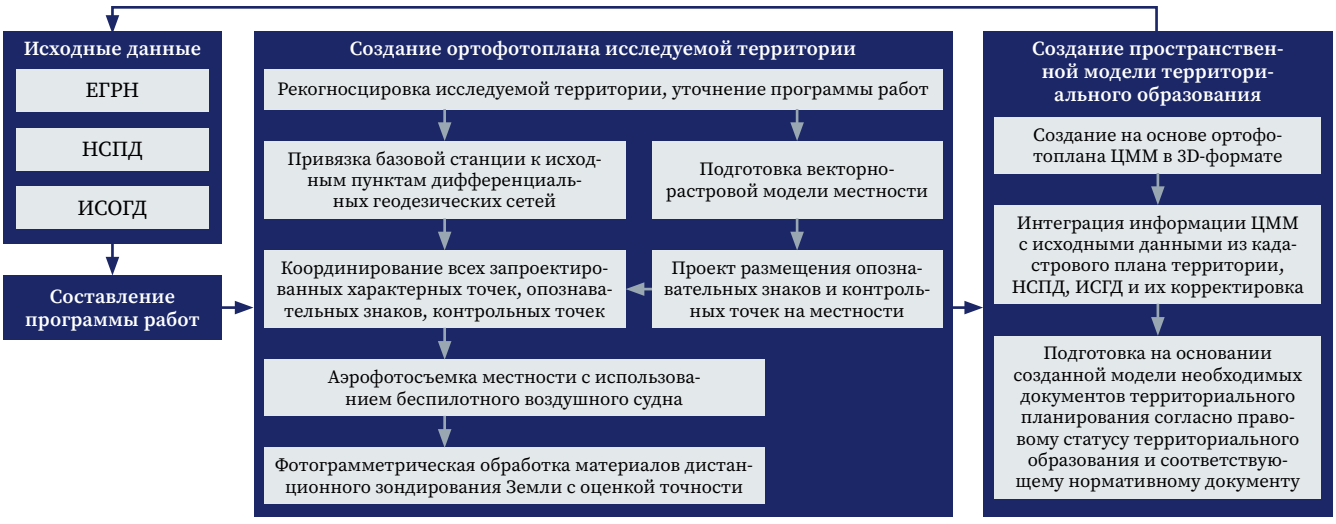
9. Пространственная модель муниципального образования должна содержать все 3D-модели объектов капитального строительства (в том числе с пространственным описанием внутренней конфигурации на основании поэтажных планов объектов капитального строительства / проектной документации, содержащихся в ЕГРН) (рис. 4).
10. В современных условиях ряд технологических операций, являющихся частью технологического процесса по формированию пространственной модели муниципального образования, может быть реализован с использованием технологий искусственного интеллекта (например, текстуризация зданий, построение типовых 3D-моделей зданий и пр.).

## 3 Результаты и обсуждение

Результатом выполненных теоретических исследований стала разработанная технологическая схема, представленная на рис. 5. Отметим, что она является системным представлением технологического процесса по подготовке документов территориального планирования, состоящим из известных технологических операций, и применима для любых объектов, расположенных на застроенных территориях.

**Рис. 5**
Укрупненная технологическая схема создания пространственной модели территориального образования

**Fig. 5**
A comprehensive technological scheme for creating a spatial model of a territorial entity



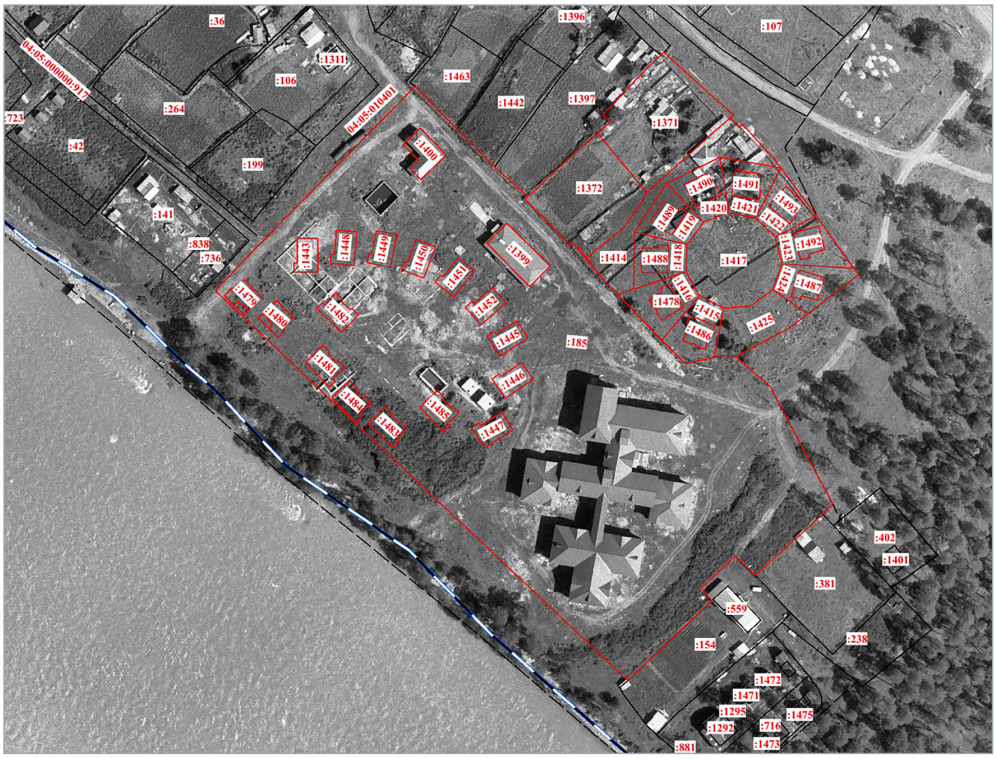
Апробация разработанной технологической схемы выполнялась на совокупности объектов недвижимости различного типа и описательных характеристик (земельные участки, объекты капитального строительства, объекты вспомогательного использования и иные) в кадастровом квартале 04:05:010401, расположенном в селе Чепош (Республика Алтай). В качестве исходного документа для обследуемой территории и расположенных на ней объектов недвижимости использовался кадастровый план территории (КПТ), который был получен благодаря работе сервиса для кадастровых инженеров «Запрос посредством доступа к ФГИС ЕГРН» в личном кабинете сайта Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии (Росреестра)[8].

Обработка исходных данных (информации с КПТ и ортофотоплана масштаба 1 : 2000, запроса в ФФПД) производилась на отечественной геоинформационной платформе «Аксиома». Важным аспектом при составлении пространственной модели местности является обязательное требование об одинаковых системах координат для ортофотоплана и предоставленного Росреестром КПТ. Невыполнение данного условия приводит к системному сдвигу исследуемой территории и серьезным ошибкам при подготовке документов территориального планирования.

Результатом явилась векторно-растровая информация об исследуемой территории (рис. 6).

**Рис. 6**
Векторно-растровое представление исследуемой территории

**Fig. 6**
Vector-raster representation of the study area




Для получения полной и достоверной модели на векторно-растровое изображение местности необходимо наложить существующие документы территориального планирования в виде генерального плана и картографических документов, отображающих существующее функциональное зонирование территории[9].

8 Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии (Росреестр): официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://rosreestr.gov.ru/ (дата обращения: 01.12.2025).

9 Об утверждении Методических рекомендаций по разработке проектов схем территориального планирования муниципальных районов, генеральных планов городских округов, муниципальных округов, городских и сельских поселений (проектов внесения изменений в такие документы): приказ Министерства экономического развития Российской Федерации от 6 мая 2024 г. № 273. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/408926338/ (дата обращения: 24.11.2025).

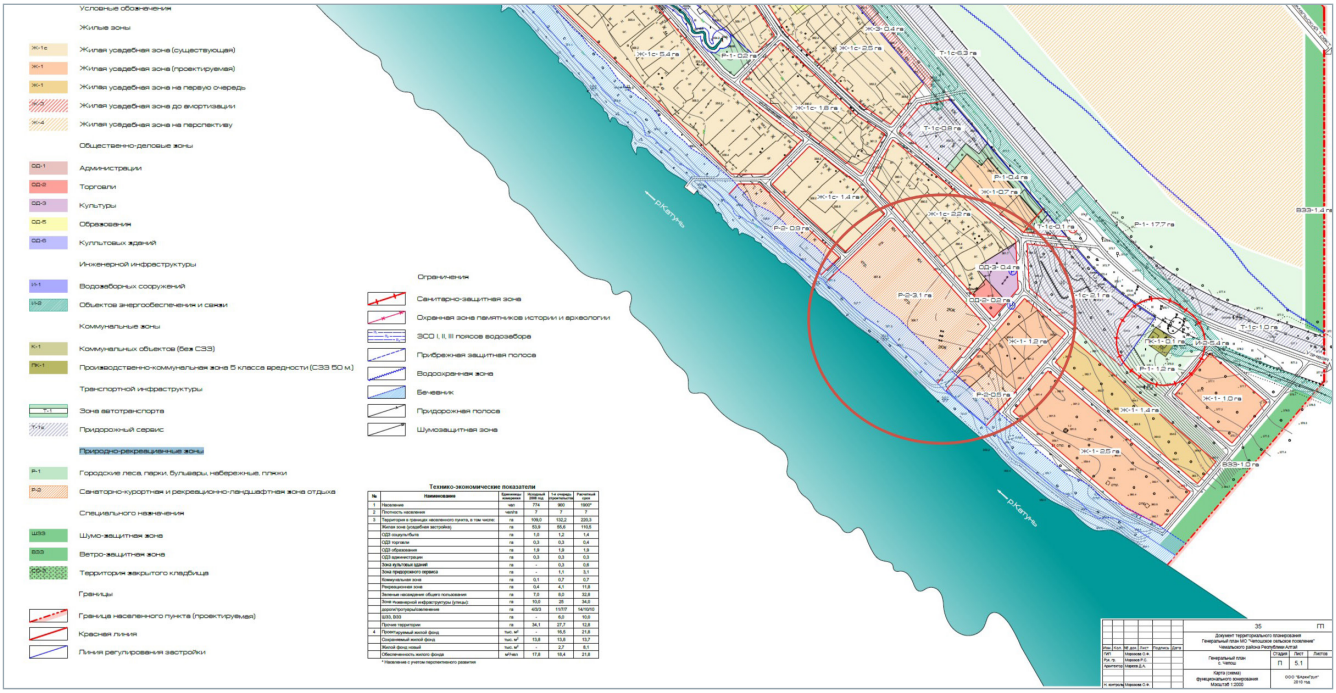


**Рис. 7**
Фрагмент карты (схемы) функционального зонирования села Чепош с отображением обследуемой территории

**Fig. 7**
Fragment of the map (diagram) of functional zoning of the village of Cheposh with the display of the surveyed territory

При несовпадении масштабов и систем координат (что, как правило, встречается в настоящее время) за исходную принимается векторно-растровая модель, составленная на основании КПТ. Фрагмент карты (схемы) функционального зонирования рассматриваемого территориального образования (села Чепош) представлен на рис. 7[10].

После составления векторно-растровой модели следующей технологической операцией является подготовка программы работ с детальной рекогносцировкой местности для анализа и (в случае необходимости) корректировкой исходной информации.

В технологическую операцию по рекогносцировке должен входить этап по определению соответствия ситуации на местности использованному ортофотоплану и КПТ (наличие не поставленных на государственный кадастровый учет объектов недвижимости, их инфраструктура, обеспеченность инженерными коммуникациями, соответствие структуры совокупности объектов недвижимости требованиям градостроительных нормативных документов).

Топографо-геодезическая изученность района работ должна состоять в определении радиотехнической видимости на ближайшие исходные пункты дифференциальных геодезических сетей (ДГС) в соответствии с имеющимся в распоряжении измерительным технологическим оборудованием — EFIX C5, обладающим следующими точностными характеристиками: статика в плане 2,5 мм + 0,5 млн$^{-1}$; статика по высоте 5 мм + 0,5 млн$^{-1}$; кинематика в реальном времени в плане 8 мм + 1 млн$^{-1}$; кинематика в реальном времени по высоте 15 мм + 1 млн$^{-1}$.

Запроектированная, а затем и реализованная схема привязки базовой станции (режим «Статика») к исходной сети ДГС (Усть-Кокса, Чемал, Горно-Алтайск) представлена на рис. 8. Во время выполнения измерений на орбите наблюдалось 28 спутников, 16 из которых были доступны для передачи сигнала на используемое оборудование. Это позволило достичь фиксированного решения при получении координат характерных точек объектов недвижимости. Инструментальная точность определения координат характерных точек составила 14 мм (менее 0,02 м).

10 Карта (схема) градостроительного зонирования с. Чепош // Официальный сайт органов местного самоуправления муниципального образования «Чепошское сельское поселение» Чемальского района Республики Алтай. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://cheposh.ru/gradostroitelstvo/pravila-zemlepolzovaniya-i-zastrojki-mo-cheposhskoe-selskoe-poselenie/2025/03/2878/ (дата обращения: 24.11.2025).

**Рис. 8**
Схема привязки базовой станции к исходным пунктам постоянно действующих базовых станций

**Fig. 8**
Diagram of the base station binding to the initial points of the continuously operating reference stations

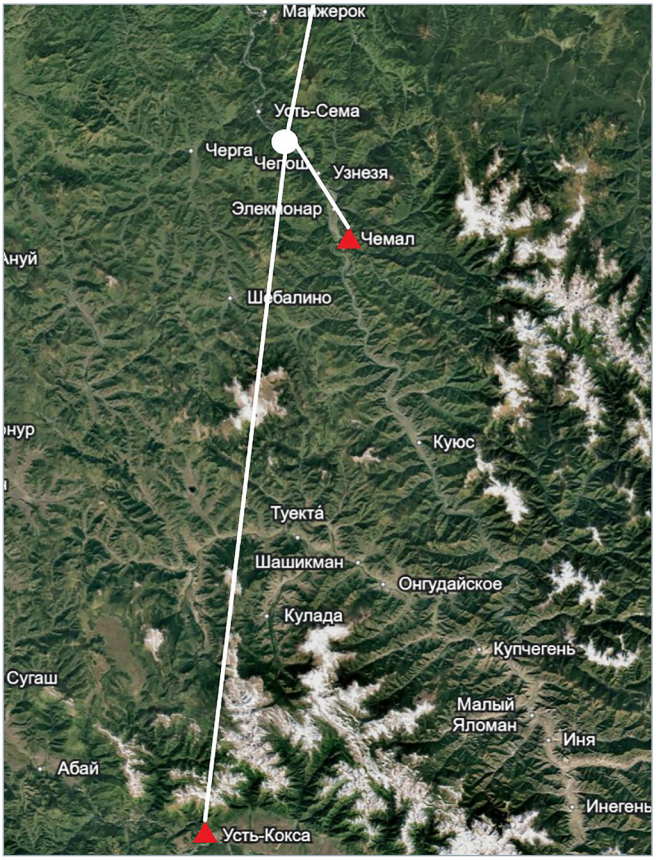



**Рис. 9**
Схема размещения опознавательных знаков и контрольных точек на исследуемой территории

**Fig. 9**
Layout of identification signs and checkpoints in the study area



Относительно базовой станции координирование остальных характерных точек, необходимых для проведения аэрофотосъемки местности, а затем и построения пространственной модели, выполнялось в режиме «Кинематика в реальном времени».

Для выполнения аэрофотосъемочных работ с применением беспилотного воздушного судна (БВС) DJI Phantom 4 Pro+ были размещены опознавательные знаки, требуемые для фотограмметрической обработки материалов дистанционного зондирования Земли, и контрольные точки, которые использовались для контроля точности созданного ортофотоплана (рис. 9). Всего было определено 20 контрольных и опорных точек.

Размещение опознавательных знаков и контрольных точек выполнялось на основе следующих научно-методических принципов:

- все опознавательные знаки и контрольные точки должны быть закреплены на местности для возможности их дальнейшего использования при осуществлении геодезического обеспечения градостроительных мероприятий в рамках разработанных документов территориального планирования;
- по возможности опознавательные знаки должны располагаться в начале и конце маршрута, а контрольные точки желательно равномерно расположить на всей обследуемой территории.

В соответствии с предложенными принципами все точки (опорные и контрольные) определяются контурами местности — люками подземных коммуникаций, четко распознаваемых на снимках.

Благодаря возможности работы с данным БВС в различных программных комплексах, разработанных для управления им, а также для подготовки полетных заданий, было выбрано мобильное приложение продукта Litchi. Аэрофотосъемка выполнялась со следующими заданными параметрами: высота — 100 м, скорость полета БВС — не более 5 м/с, зоны продольного и поперечного перекрытия снимком — 75 %. В результате выполнения аэрофотосъемки по заданному маршруту за 18 мин. было получено 396 изображений высокого качества с пространственным разрешением 2,62 см/пикс. Обработка полученных снимков в программном комплексе Agisoft Metashape (разработчик — российская компания ООО «ЖивойСофт») позволила подготовить ортофотоплан на обследуемую местность (рис. 10), а также текстурированную модель территории, представляющую собой массив точек с добавлением текстуры местности (рис. 11).

На основании стандартной, утвержденной соответствующими нормативными документами методики фотограмметрической обработки аэроснимков с БВС для создания ортофотоплана местности получены результаты, которые приведены в табл. 1.

**Рис. 10**
Ортофотоплан обследуемой местности

**Fig. 10**
An orthophotomap of the surveyed area



**Рис. 11**
Текстурированная модель исследуемой территории

**Fig. 11**
A textured model of the surveyed area



**Таблица 1**
Расхождения в координатах опорных точек, полученные в результате фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки

**Table 1**
Discrepancies in the coordinates of the reference points obtained as a result of photogrammetric processing of aerial photography materials

| Опорная точка | Расхождения, см | | |
|---|---|---|---|
| | $\Delta x$ | $\Delta y$ | $\Delta H$ |
| Оп1 | 0,9 | 7,7 | 1,8 |
| Оп2 | −6,9 | −7,7 | 0,6 |
| Оп3 | 6,1 | 4,3 | −1,2 |
| Оп4 | −14,5 | −5,9 | 0,3 |
| Оп5 | 4,3 | 3,4 | 0,3 |
| Оп6 | −2,9 | 0,7 | −2,3 |
| Оп7 | 1,3 | 0,3 | −0,5 |
| Оп8 | −1,2 | −0,5 | 0,1 |
| Оп9 | 2,8 | −2,8 | 0,8 |
| Оп10 | 5,6 | 0,3 | 1,6 |
| Оп11 | 4,1 | −0,5 | −0,1 |
| Оп12 | 0,3 | 0,5 | −0,2 |
| $M$ | −0,1 | −0,2 | 1,2 |
| $m$ | 5,6 | 4,0 | 1,1 |

Применение формулы Гаусса позволяет вычислить средние квадратические ошибки создания ортофотоплана по всем координатным осям используемой в настоящее время координатной системы:

1
$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta_i^2}{n}} \le m_{норм},$$

где $m_{норм}$ — нормативная точность определения координат характерных точек, закрепляющих в виртуальном пространстве и на местности границы объектов недвижимости.

Вычисление оценки математического ожидания вектора расхождения по соответствующим координатным осям позволяет оценить наличие возможных систем систематических сдвигов изображений при создании ортофотоплана:

2
$$M = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta_i}{n} \le m_{норм}.$$

Полученные результаты позволяют сделать предварительный вывод о соответствии созданного ортофотоплана нормативным требованиям геодезического обеспечения кадастровых работ, обусловленным категорией земель, к которой относится исследуемая территория.

Вместе с этим следует отметить, что в соответствии со стандартной методикой создания ортофотоплана окончательная оценка точности результатов должна выполняться на основании сравнения координат контрольных точек, полученных с помощью наземных геодезических определений и измеренных по ортофотоплану. Результаты оценки точности по контрольным точкам приведены в табл. 2.

**Таблица 2**
Расхождения в координатах контрольных точек

**Table 2**
Discrepancies in the coordinates of the control points

| Контрольная точка | Расхождения, см | | |
|---|---|---|---|
| | $\Delta x$ | $\Delta y$ | $\Delta H$ |
| К1 | 18,6 | −2,2 | 1,9 |
| К2 | 17,2 | 7,3 | 18,2 |
| К3 | 0,1 | −3,4 | −3,0 |
| К4 | −8,4 | 0,1 | −3,8 |
| К5 | 3,9 | 5,3 | 16,2 |
| К6 | 4,1 | −2,2 | 7,1 |
| К7 | −3,0 | 3,7 | −5,2 |
| К8 | −2,6 | −1,0 | −2,2 |
| $M$ | 29,9 | 7,6 | 29,2 |
| $m$ | 9,7 | 3,8 | 9,4 |

Анализируя данные, представленные в табл. 1 и 2, можно сделать следующие выводы.

1. Результаты оценки точности при фотограмметрической обработке материалов аэрофотосъемки позволяют утверждать, что созданный ортофотоплан по всем точностным параметрам соответствует требованиям нормативных документов для координирования объектов недвижимости, расположенных на землях населенных пунктов.
2. Оценка точности по контрольным точкам, обеспечивающая более достоверные результаты, определяет соответствие точностных параметров ортофотоплана только для координирования объектов недвижимости, которые расположены на землях сельскохозяйственного назначения, предоставленных для индивидуального жилищного строительства, при этом в пределах нормативной точности отмечается систематический сдвиг ортофотоплана по координатной оси $x$.

Одним из заключительных этапов выполнения технологической схемы, разработанной в рамках научного исследования, является формирование ЦММ, которая представляет собой трехмерную модель, основанную на геопространственных данных и включающую информацию об объектах, расположенных на территории исследования, а также их характеристиках. В рамках выполнения работ по формированию ЦММ комплекса отдыха и оздоровления «Грушевый цвет», расположенного в селе Чепош Чемальского района Республики Алтай, было выполнено моделирование трехмерных конструктивных объектов с использованием комплекса программных средств и генеративного искусственного интеллекта.

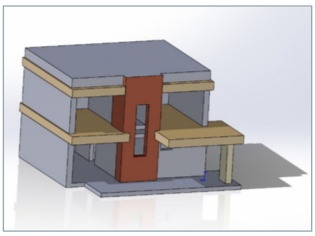
Первоначальный этап создания модели предусматривал интеграцию данных, полученных в результате геодезической съемки и в ходе аэрофотосъемочных работ.

На стадии реализации трехмерной цифровой репрезентации объектов ориентир взят на контрольные точки, закрепленные на строительных конструкциях, а также на отметки привязки, зафиксированные в местной системе координат. За нулевую отметку принята отметка чистого пола первого этажа. В процессе моделирования в программном обеспечении SOLIDWORKS 2022 были созданы базовые геометрические формы на основе исходных данных по разверткам и разрезам (рис. 12). Однако в ходе внутреннего контроля выявлены ограничения по объему моделирования сложных сопряжений и архитектурных элементов, отсутствие контроля габаритов здания. Опыт создания 3D-моделей в данном программном обеспечении не позволил качественно выполнить проект. В связи с этим реализация проекта была продолжена в программном комплексе SketchUp, что позволило более гибко визуализировать архитектурные решения с минимальной потерей контроля точности объемно-планировочных данных, согласно техническому плану и выполненным измерениям (рис. 12).

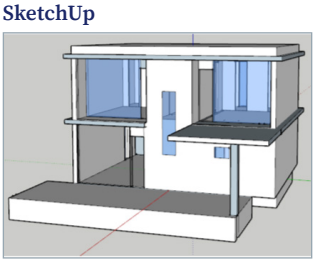
**Рис. 12**
Примеры разработанных 3D-моделей объектов недвижимости

**Fig. 12**
Examples of developed 3D models of real estate objects

SOLIDWORKS 2022



SketchUp

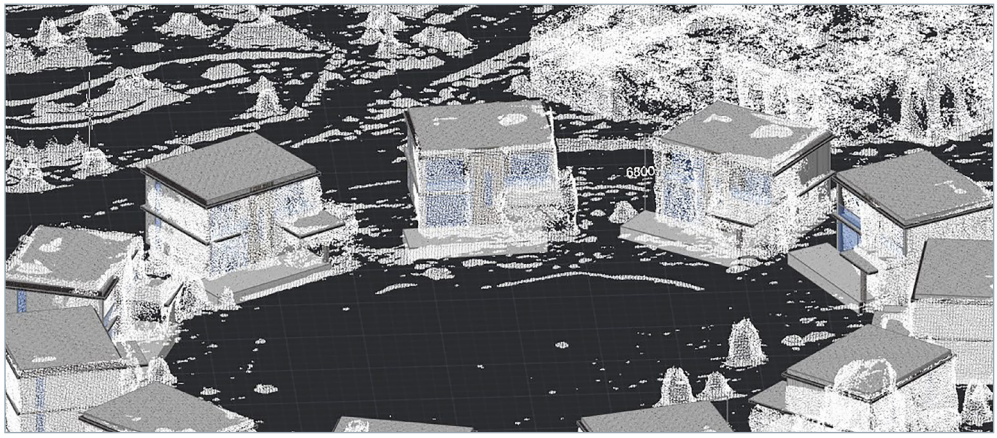


В программном комплексе SketchUp была выполнена детальная отрисовка конструктивных элементов: фундаментов, несущих стен, перекрытий, кровли и внутренних перегородок с учетом проектных отметок (абсолютных и относительных высот). Для получения наглядного изображения внутренних помещений применена функция секущей плоскости (разреза). Плоскость установлена параллельно одной из главных осей здания, что позволило получить ортогональную проекцию внутреннего пространства. Контроль выполнялся с помощью проверки соответствия проектных вертикальных отметок (высота потолков, толщина стен) проектной документации с использованием инструментов «Измерение высот и отметок» и с проверкой геометрических параметров линейных и угловых размеров всех внутренних помещений согласно техническому плану здания.

На следующем этапе в программном комплексе nanoCAD были импортированы геодезические данные (ЦМР, горизонтали, точки с абсолютными высотными отметками) в местной системе координат. Выполнена геодезическая привязка планового положения зданий. Определены координаты углов и осей зданий на местности с учетом градостроительных ограничений. Осуществлена «посадка» зданий по высоте (рис. 13). В качестве контроля была проведена сверка высот областей расположения домов отдыха согласно их ортогональной проекции на выгруженных точках после проведения съемочных работ.

**Рис. 13**
Пример интеграции разработанного проекта в программный комплекс nanoCAD

**Fig. 13**
An example of integrating a developed project into the nanoCAD software package



Завершающим этапом технологического цикла по формированию ЦММ стало выполнение интеграционного преобразования цифровых 3D-моделей зданий и рельефа с применением нейросетевой технологии Qwen3-Max и ChatGPT 5. Используемая нейросеть осуществила формирование визуального отображения геопространственной системы объектов, основанной на исходных данных точечного облака и аэрофотоснимков (рис. 14). В процессе создания модели был выполнен контроль относимых к системе координат объектов, обеспечивающий сохранение исходных габаритных параметров и исключающий, в соответствии с требованиями нормативных документов[11,12], искажение масштабных соотношений. Проведенная работа значительно повышает уровень информационной поддержки проекта, обеспечивает возможность дальнейшего анализа геометрических характеристик объектов с учетом реальных размеров и формы, а не только визуальных образов, а также позволяет существенно оптимизировать работы, имеющие актуальное значение для реализации смежных направлений [12–14].

**Рис. 14**
Примеры визуализации разработанного проекта с применением нейросетевых технологий Qwen3-Max и ChatGPT 5

**Fig. 14**
Examples of visualization of the developed project using Qwen3-Max and ChatGPT 5 neural network technologies



11 СП 2.13130.2012. Свод правил. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/1200096437 (дата обращения: 24.11.2025).

12 ГОСТ 21.1101-2013. Система проектной документации для строительства. Основные требования к проектной и рабочей документации. М.: Стандартинформ, 2014. 54 с.

# 4 Выводы

В процессе проведенных теоретических и экспериментальных исследований были получены следующие результаты:

- разработана технологическая схема создания пространственной модели территориального образования на примере муниципального образования «Чепошское сельское поселение» Чемальского района Республики Алтай;
- для реализации разработанной технологической схемы предложено использование отечественного программного обеспечения, позволяющего на основе материалов дистанционного зондирования Земли (аэрофотосъемки, выполненной с использованием БВС) и всей существующей совокупности исходной кадастровой и градостроительной информации построить пространственную модель местности для подготовки необходимых документов территориального планирования с целью дальнейшего устойчивого развития исследуемой территории;
- предложен математический алгоритм, позволяющей оценивать качество создаваемой пространственной модели территориального образования.

Разработанная технологическая схема позволяет:

- повысить инвестиционную привлекательность территории (обеспечить информированность инвесторов, провести интеграцию инвестиционного и градостроительного процессов, сократить сроки оказания услуг);
- интегрировать сведения ЕГРН, ФФПД, ИСОГД в НСПД, а также данные информационного моделирования объектов капитального строительства, систем цифрового моделирования инженерно-коммунальных и транспортных сетей, что обеспечит контроль и сокращение бюджетных затрат при проектировании и строительстве объектов;
- обеспечить возможность прогнозирования, планирования и реализации мероприятий по противодействию чрезвычайным ситуациям природного и техногенного характера, что приведет к сокращению рисков и будет способствовать минимизации ущерба.

**библиография**


1. Колодий Н.А., Иванова В.С., Гончарова Н.А. Умный город: особенности концепции, специфика адаптации к российским реалиям // Социологический журнал. 2020. Т. 26, № 2. С. 102–123. DOI:10.19181/socjour.2020.26.2.7268.
2. Шаповалов Д.А., Бегляров Н.С. Аналитический обзор развития многомерных систем учета и регистрации прав и объектов недвижимости в парадигме «умного города» // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2021. № 3. С. 185–192. DOI:10.33920/sel-04-2103-04.
3. Карпик А.П., Мусихин И.А., Ветошкин Д.Н. Интеллектуальные информационные модели территорий как эффективный инструмент пространственного и экономического развития // Вестник СГУГиТ. 2021. Т. 26, № 2. С. 155–163. DOI:10.33764/2411-1759-2021-26-2-155-163.
4. Гук А.П., Шляхова М.М. Некоторые проблемы построения реалистических измерительных 3D-моделей по данным дистанционного зондирования // Вестник СГУГиТ. 2015. Т. 4, № 32. С. 51–60.
5. Аврунев Е.И., Горобцов С.Р. Геодезическое обеспечение кадастровых работ: монография. Новосибирск: СГУГиТ, 2024. 239 с.
6. Аврунев Е.И., Вылегжанина В.В., Гиниятов И.А. К вопросу о создании трехмерного кадастра на застроенных территориях // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения: сборник материалов IV Национальной научно-практической конференции: в 3 ч. Новосибирск: СГУГиТ, 2021. Ч. 1. С. 25–30.
7. Ветошкин Д.Н. Разработка усовершенствованной модели земельно-информационной системы муниципального образования: дис. … канд. техн. наук. Новосибирск, 2021. 184 с.
8. Гура Д.А. Методологические принципы трехмерной идентификации объектов недвижимости // Вестник СГУГиТ. 2025. Т. 30, № 4. С. 109–116. DOI:10.33764/2411-1759-2025-30-4-109-116.

9. Indrajit A., Ploeger H., van Loenen B., et al. Designing Open Spatial Information Infrastructure to Support 3D Urban Planning in Jakarta Smart City // Proceedings of the 6th International FIG 3D Cadastre Workshop, Delft, The Netherlands, October 2–4, 2018. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://gdmc.nl/3dcadastre/literature/3Dcad_2018_18.pdf (дата обращения: 01.12.2025).
10. Kumar P., Rahman A.A., Buyuksalih G. Automated Extraction of Buildings from Aerial LiDAR Point Cloud and Digital Imaging Datasets for 3D Cadastre – Pre-liminary Results // Proceedings of the World Cadastre Summit, Congress, Istanbul, Turkey, 20–25 April 2015. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2015_09.pdf (дата обращения: 01.12.2025).
11. Steudler D. CADASTRE 2014 and Beyond. FIG Publication No. 61. Helsinki: Hakapaino, 2014. 84 p.
12. Комиссаров А.В., Хлебникова Т.А. Проблемы цифровизации инженерных изысканий: подходы к их решению // Вестник СГУГиТ. 2025. Т. 30, № 6. С. 48–58. DOI:10.33764/2411-1759-2025-30-6-48-58.
13. Болдырев Г.Г. Трехмерное моделирование и визуализация данных инженерно-геологических изысканий. Состояние вопроса и практическая реализация // Инженерные изыскания. 2022. Т. 16, № 1. С. 8–26. DOI:10.25296/1997-8650-2022-16-1-8-26.
14. Искаков Д.В. Автоматизация процессов BIM-моделирования по данным проектной документации // Вестник СГУГиТ. 2025. Т. 30, № 4. С. 5–14. DOI:10.33764/2411-1759-2025-30-4-5-14.

## авторы

**Аврунев Евгений Ильич**
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», Новосибирск, Россия
кафедра кадастра и территориального планирования, Институт кадастра и природопользования
канд. техн. наук, доцент
0000-0003-3172-5330

**Гармаш Вера Владимировна**
vera.v.garmash@gmail.com
ООО «СИТИ», Новосибирск, Россия
0009-0003-0247-9596

**Гоголев Дмитрий Владимирович**
gogolevdv96@mail.ru
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», Новосибирск, Россия
кафедра кадастра и территориального планирования, Институт кадастра и природопользования
0009-0000-0742-0436

**Чернов Александр Викторович**
avch-1011@mail.ru
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», Новосибирск, Россия
кафедра кадастра и территориального планирования, Институт кадастра и природопользования
канд. техн. наук
0000-0002-8033-8356

**Поступила 03.12.2025. Принята к публикации 20.02.2026. Опубликована 27.02.2026.**

UDC 528.4
DOI:10.30533/GiA-2026-010

CC BY

# Development of a Technological Scheme for Creating a Spatial Model of a Territorial Entity for the Preparation of Territorial Planning Documents

**E.I. Avrunev**[1] ✉, **V.V. Garmash**[2], **D.V. Gogolev**[1], **A.V. Chernov**[1]

[1] Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
[2] Limited Liability Company "CITY", Novosibirsk, Russia
✉ avrunev-ei@yandex.ru

**citation** Avrunev EI, Garmash VV, Gogolev DV, Chernov AV. Development of a Technological Scheme for Creating a Spatial Model of a Territorial Entity for the Preparation of Territorial Planning Documents. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2026;70(1): 157–173. DOI:10.30533/GiA-2026-010.

**keywords** technological scheme, territorial planning documents, aerial photography, coordination, identification mark, control point, orthophotomap, digital terrain model, real estate object

**abstract** This article examines the pressing issue of information support for the preparation of territorial planning documents, which is currently based on disparate data presented primarily in 2D format. A proposed solution is the development of a comprehensive process flow for creating a multifunctional spatial model of a municipality. The proposed approach is based on the integration of Unified State Register of Real Estate data, aerial photography / airborne laser scanning data, 3D modeling results, and artificial intelligence technologies. The paper presents the scientific and methodological principles for developing such a model, including the need to create a geodetic basis, use a unified coordinate system, and ensure data consistency and accessibility. The results of testing the developed process flow using the example of the village of Cheposh (Altai Republic) are presented, including the stages of geodetic work, aerial photography using UAVs, photogrammetric processing, assessment of the accuracy of the obtained materials (orthomosaic, digital terrain model), and 3D modeling of real estate objects. It is shown that the implementation of the proposed scheme allows for improving the quality of information support for government bodies, the efficiency of land resource use, the investment attractiveness of territories, and also provides a basis for data integration within the National Spatial Data System.

## references


1. Kolodiy NA, Ivanova VS, Goncharova NA. Umnyi gorod: osobennosti kontseptsii, spetsifika adaptatsii k rossiiskim realiyam [Smart City: The Concept and Its Adaptation to the Russian Context]. ***Sociological Journal.*** 2020;26(2): 102–123. (In Russian). DOI:10.19181/socjour.2020.26.2.7268.
2. Shapovalov DA, Beglyarov NS. Analiticheskii obzor razvitiya mnogomernykh sistem ucheta i registratsii prav i ob"ektov nedvizhimosti v paradigme "umnogo goroda" [Analytical Review of Real Estate Accounting and Registration Systems Considering the "Smart City" Paradigm]. ***Land Management, Cadastre, and Land Monitoring.*** 2021;3: 185–192. (In Russian). DOI:10.33920/sel-04-2103-04.
3. Karpik AP, Musikhin IA, Vetoshkin DN. Intellektual'nye informatsionnye modeli territorii kak effektivnyi instrument prostranstvennogo i ekonomicheskogo razvitiya [Smart Information Models as an Effective Tool of Regional Spatial and Economic Development]. ***Vestnik SSUGT.*** 2021;26(2): 155–163. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2021-26-2-155-163.
4. Guk AP, Shlyakhova MM. Nekotorye problemy postroeniya realisticheskikh izmeritel'nykh 3D-modelei po dannym distantsionnogo zondirovaniya [Several Aspects of Metric Realistic 3D Models Creation Remote Sensing Data]. ***Vestnik SSUGT.*** 2015;4(32): 51–60. (In Russian).
5. Avrunev EI, Gorobtsov SR. ***Geodezicheskoe obespechenie kadastrovykh rabot*** [Geodetic Support for Cadastral Works] [monograph]. Novosibirsk: SSUGT; 2024. 239 p. (In Russian).
6. Avrunev EI, Vylegzhanina VV, Giniyatov IA. K voprosu o sozdanii trekhmernogo kadastra na zastroennykh territoriyakh [Creation of Three-Dimensional Cadastre in Built-Up Areas]. ***Regulation of Land and Property Relations in Russia: Legal and Geospatial Support, Real Estate Valuation, Ecology, Technological Solutions: Proceedings of the IV National Scientific and Practical Conference.*** In 3 parts. Part 1. Novosibirsk: SSUGT; 2021: 25–30. (In Russian).
7. Vetoshkin DN. ***Razrabotka usovershenstvovannoi modeli zemel'no-informatsionnoi sistemy munitsipal'nogo obrazovaniya*** [Development of an Improved Model of the Municipal Land Information System] [dissertation]. Novosibirsk; 2021. 184 p. (In Russian).
8. Gura DA. Metodologicheskie printsipy trekhmernoi identifikatsii ob"ektov nedvizhimosti [Methodological Approaches to Three-Dimensional Identification and Registration of Real Estate Objects]. ***Vestnik SSUGT.*** 2025;30(4): 109–116. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2025-30-4-109-116.
9. Indrajit A, Ploeger H, van Loenen B, et al. Designing Open Spatial Information Infrastructure to Support 3D Urban Planning in Jakarta Smart City. ***Proceedings of the 6th International FIG 3D Cadastre Workshop, Delft, The Netherlands, October 2–4, 2018.*** Available from: https://gdmc.nl/3dcadastre/literature/3Dcad_2018_18.pdf (Accessed 1 December 2025).
10. Kumar P, Rahman AA, Buyuksalih G. Automated Extraction of Buildings from Aerial LiDAR Point Cloud and Digital Imaging Datasets for 3D Cadastre – Pre-liminary Results. ***Proceedings of the World Cadastre Summit, Congress, Istanbul, Turkey, 20–25 April 2015.*** Available from: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2015_09.pdf (Accessed 1 December 2025).
11. Steudler D. ***CADASTRE 2014 and Beyond.*** FIG Publication No. 61. Helsinki: Hakapaino; 2014. 84 p.
12. Komissarov AV, Khlebnikova TA. Problemy tsifrovizatsii inzhenernykh izyskanii: podkhody k ikh resheniyu [Problems of Digitalization of Engineering Surveys: Approaches to Their Solution]. ***Vestnik SSUGT.*** 2025;30(6): 48–58. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2025-30-6-48-58.
13. Boldyrev GG. Trekhmernoe modelirovanie i vizualizatsiya dannykh inzhenerno-geologicheskikh izyskanii. Sostoyanie voprosa i prakticheskaya realizatsiya [Three-Dimensional Modeling and Visualization of Engineering and Geological Survey Data. The Status of the Issue and Its Practical Implementation]. ***Engineering Survey.*** 2022;16(1): 8–26. (In Russian). DOI:10.25296/1997-8650-2022-16-1-8-26.
14. Iskakov DV. Avtomatizatsiya protsessov BIM-modelirovaniya po dannym proektnoi dokumentatsii [Automation of BIM Modeling Processes Based on Project Documentation Data]. ***Vestnik SSUGT.*** 2025;30(4): 5–14. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2025-30-4-5-14.

authors

**Evgeny I. Avrunev**
Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
Department of Cadastre and Territorial Planning, Institute of Cadastre and Nature Management
PhD in Engineering, Associate Professor
0000-0003-3172-5330

**Vera V. Garmash**
vera.v.garmash@gmail.com
Limited Liability Company “CITY”, Novosibirsk, Russia
0009-0003-0247-9596

**Dmitry V. Gogolev**
gogolevdv96@mail.ru
Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
Department of Cadastre and Territorial Planning, Institute of Cadastre and Nature Management
0009-0000-0742-0436

**Alexander V. Chernov**
avch-1011@mail.ru
Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
Department of Cadastre and Territorial Planning, Institute of Cadastre and Nature Management
PhD in Engineering
0000-0002-8033-8356

**Submitted: December 03, 2025. Accepted: February 20, 2026. Published: February 27, 2026.**

УДК 543.42
DOI:10.30533/GiA-2026-011

CC BY

# Автоматическая калибровка лазерного спектрометра для мониторинга газов: подход на основе диодно-лазерной абсорбционной спектроскопии

**М.А. Терин**[1,2] ✉, **А.С. Филонов**[1]

[1] Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия
[2] ООО «БО-ЭНЕРГО», Москва, Россия
✉ kresh80@mail.ru

**цитирование** Терин М.А., Филонов А.С. Автоматическая калибровка лазерного спектрометра для мониторинга газов: подход на основе диодно-лазерной абсорбционной спектроскопии // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 1. С. 174–183. DOI:10.30533/GiA-2026-011.

**ключевые слова** диодно-лазерная абсорбционная спектроскопия, мониторинг газов, лазерная спектроскопия, автоматическая калибровка

**аннотация** Точность измерений концентрации газов с помощью лазерного спектрометра критически зависит от качества его калибровки. В серийном производстве спектрометров традиционные методы калибровки, требующие участия оператора, приводят к субъективным ошибкам, увеличению времени настройки и нестабильности результатов. В данной работе предложен полностью автоматизированный метод калибровки диодных лазерных абсорбционных спектрометров, исключающий влияние человеческого фактора и обеспечивающий стандартизацию процесса для массового производства. Технология основана на использовании эталонных газовых смесей с точно известными концентрациями, алгоритмов адаптивной настройки лазерных параметров и автоматизированной обработки спектральных данных. Предлагаемый метод автоматической калибровки диодных лазерных абсорбционных спектрометров позволяет стандартизировать процесс для массового производства и повысить надежность измерений для газов $CH_4$, $C_2H_4$ и $C_2H_6$. Экспериментальная проверка на смесях $N_2/CH_4$ показала, что данный подход обеспечивает погрешность калибровки не более 2 %, что соответствует требованиям промышленного мониторинга. Применение метода открывает новые возможности для массового производства диодно-лазерных абсорбционных спектрометров. В статье также представлены перспективы развития технологии.

# 1 Введение

Метод диодно-лазерной абсорбционной спектроскопии (ДЛАС; *англ.* Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS) благодаря высокой чувствительности и селективности широко применяется для точного измерения концентрации газов [1]. Однако точность измерений критически зависит от качества калибровки прибора [2, 3], особенно при промышленном производстве спектрометров. Как показывают исследования, именно качество калибровки становится ключевым фактором, определяющим точность и воспроизводимость измерений в реальных условиях.

В промышленном мониторинге газовых смесей предъявляются повышенные требования к точности и воспроизводимости измерений. Особую сложность представляет калибровка измерительных приборов на этапе их производства, где традиционные ручные методы демонстрируют ряд существенных ограничений, таких как:

- субъективные ошибки и высокая вариабельность из-за различий между приборами, человеческого фактора и влияния внешних условий [4];
- значительные временные затраты, снижающие производительность серийного производства;
- нестабильность результатов в эксплуатации из-за возможных отклонений при первоначальной калибровке.

Современные системы калибровки диодно-лазерных абсорбционных спектрометров можно условно разделить на три категории: ручные, полуавтоматические и полностью автоматические.

Полуавтоматические системы, как правило, требуют ручной настройки или валидации. Например, в работе, посвященной измерению $C_2H_4$ в условиях шахт [5], для калибровки использовался высокоточный автоматический дозатор газов Environics2000. Однако, несмотря на автоматическую подачу газа, конечная калибровка концентрации выполнялась с помощью многофакторного алгоритма, который требовал ручной валидации и подбора параметров для компенсации перекрестных помех между спектральными линиями $CH_4$ и $C_2H_4$. В итоге максимальная погрешность измерения составила 2,4 % [5].

В работе по многокомпонентному измерению CO и $CO_2$ в нефтехимии [6] рассматриваются алгоритмы частичной регрессии наименьших квадратов, которые требуют создания обучающих выборок на основе ручных экспериментальных данных. Это приводит к субъективным ошибкам и ограничениям в применении газов (используются только те, для которых были проведены калибровочные эксперименты) [6]. Как отмечается в статье [7], проблема перекрестных помех при многокомпонентном TDLAS-детектировании остается критической, алгоритмические методы коррекции не устраняют интерференцию на корневом уровне, что подтверждает необходимость точного приготовления калибровочных смесей.

Эти недостатки особенно критичны в задачах промышленного мониторинга многокомпонентных смесей, где требуются высокая скорость измерений, минимальное вмешательство человека и одновременная калибровка для нескольких газов.

Примером полностью автоматического подхода является работа, в которой предложена онлайн-самокалибровка TDLAS-анализатора с использованием эталонной газовой ячейки, автоматически компенсирующей влияние температуры и давления [8]. Однако данное решение ориентировано на мониторинг одного газа и не обеспечивает стандартизацию калибровки для многокомпонентных смесей в серийном производстве.

Современные полностью автоматические системы калибровки ДЛАС демонстрируют значительный прогресс, в том числе за счет внедрения алгоритмов машинного обучения. Так, в работе [9] предложено использовать регрессию на основе гауссовских процессов для прямого определения концентраций из спектров, что позволяет обойти сложный и трудоемкий процесс поточечной аппроксимации спектральных линий. Китайским исследователям с помощью нейросетевой модели при анализе $CO_2$ методом TDLAS-анализа удалось достичь

коэффициента детерминации 0,9884 [10]. Применение физико-информированных нейронных сетей для решения нелинейных задач лазерной абсорбционной спектроскопии также продемонстрировано в статье [11], где нейросетевая модель использовалась для восстановления концентрации $CO_2$ по TDLAS-спектрам. В работе [12] разработан метод томографической абсорбционной спектроскопии с использованием обучаемого метода восстановления спектра поглощения, который позволил снизить погрешность измерения температуры с 4,6 до 0,9 % в лабораторных условиях при измерении в статической кювете.

Однако рассмотренные подходы имеют такие критические для массового внедрения ограничения, как:

- высокая стоимость и сложность реализации алгоритмов машинного обучения;
- потребность в больших объемах обучающих данных;
- избыточность функционала для большинства промышленных задач, где требуется стандартизированный и воспроизводимый процесс.

Был разработан полностью автоматизированный метод калибровки, основанный на применении газосмесителя МХМ (Alicat Scientfic), устраняющий влияние человеческого фактора и обеспечивающий стандартизацию процесса для серийного производства с использованием:

1) эталонов газовых смесей с точно известными концентрациями [13];
2) алгоритма автоматического смешивания газовой смеси;
3) алгоритма адаптивной настройки лазерных параметров;
4) автоматизированной обработки спектральных данных.

В отличие от других автоматизированных систем, наша разработана на базе прибора МХМ, который имеет меньшую стоимость, может работать в любых условиях, способен создавать смесь из четырех газов, при этом погрешность системы составляет не более 2 %.

# 2 Материалы и методы

## 2.1 Принцип работы диодно-лазерного абсорбционного спектрометра

Сущность метода ДЛАС состоит в том, что лазерный луч настраивается на определенную длину волны, которая соответствует характерным спектрам поглощения газа. Когда лазерный свет проходит через образец, молекулы газа могут поглощать этот свет, что приводит к снижению его интенсивности. Изменение интенсивности света на разных длинах волн позволяет определить концентрацию газа.

В лазерных спектрометрах используются диодные лазеры, которые могут работать в специфическом диапазоне длин волн. Данные лазеры способны настраиваться на определенные длины волн, которые соответствуют молекулярным спектрам поглощения искомого газа. Газовый образец помещается в оптическую ячейку, через которую проходит лазерный луч. В качестве газового образца можно использовать атмосферу, выбросы из промышленных процессов или любой другой газ. Каждое вещество имеет уникальный спектр поглощения, что позволяет различать газы по их молекулярным характеристикам. Лазер настраивается на длину волны, соответствующую поглощению целевого газа. Постепенно изменяя длину волны (например, с помощью перестройки частоты), можно выявить, на каких длинах волн происходит поглощение.

Датчик (например, фотодетектор) принимает лазерный свет после прохождения через газ. Сравнивается интенсивность света до и после прохождения через образец. Падение интенсивности связано с поглощением света газом. Значения поглощенной интенсивности на разных длинах волн записываются и анализируются для создания спектра поглощения.

Изменения в интенсивности света на различных длинах волн позволяют определить концентрацию газа. ДЛАС может использоваться в различных условиях окружающей среды, в том числе при низких и высоких значениях температуры и давления.

Измерение концентрации газов в лазерной ячейке (рис. 1) проводится по закону Бугера — Ламберта — Бера. Согласно этому закону, интенсивность прошедшего излучения можно определить по следующей формуле:

$$I(v) = I_0(v)e^{-K(v)L}, \quad (1)$$

где $I_0(v)$ — интенсивность излучения до попадания в ячейку;
$K(v)$ — частотно-зависимый коэффициент поглощения;
$L$ — длина оптического пути.

Частотно-зависимый коэффициент поглощения включает в себя коэффициент поглощения $\alpha(v)$ и концентрацию вещества $C$:

$$K(v) = \alpha(v) \times C.$$

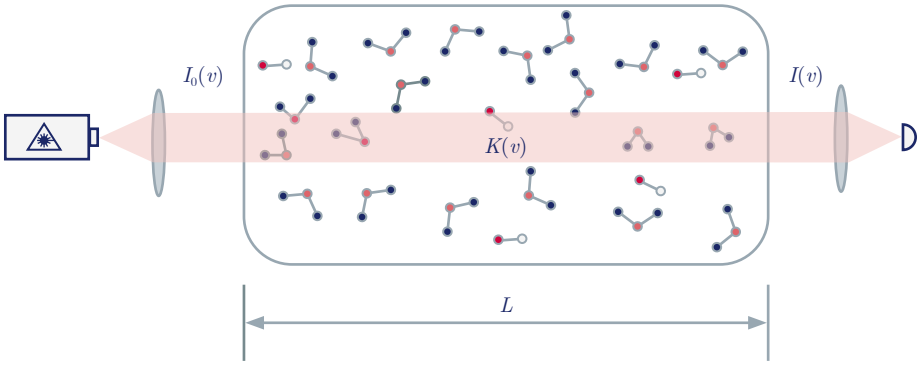



**Рис. 1**
Измерение концентрации газов в лазерной ячейке

**Fig. 1**
Measurement of gas concentration in a laser cell

Закон Бугера — Ламберта — Бера можно выразить через поглощение и оптическую плотность:

$$K(v) \times L = S_0(v) \times C \times N \times L = \ln\left(\frac{I_0(v)}{I(v)}\right), \quad (2)$$

где $S_0(v)$ — интенсивность линии поглощения;
$N$ — число Лошмидта.

Выбрав параметр интенсивности линии поглощения через базу данных HITRAN[1], можно определить концентрацию газа в лазерной ячейке.

## 2.2 Экспериментальная установка

В качестве спектрометра для калибровки использовался лазерный стенд, входящий в систему мониторинга и диагностики трансформаторного оборудования «Звезда»[2], разработанный компанией «БО-ЭНЕРГО». Данный спектрометр предназначен для детектирования в масле трансформаторов концентраций таких газов, как CO, $CO_2$, $CH_4$, $C_2H_2$, $C_2H_4$ и $C_2H_6$. По концентрации газов в масле можно определить текущее состояние трансформатора и при необходимости выполнить ремонт.

1 The HITRAN Database. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://hitran.org (дата обращения: 20.06.2025).

2 Автоматизированная система мониторинга и диагностики трансформаторного оборудования (АСМД) «Звезда» / ООО «БО-ЭНЕРГО.АСТС». [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.bo-energo.ru/equipment/dlya-silovykh-transformatorov/nepreryvnyy-monitoring-osnovnykh-parametrov/avtomatizirovannaya-sistema-monitoringa-i-diagnostiki-transformatornogo-oborudovaniya-asmd-zvezda/ (дата обращения: 17.06.2025).

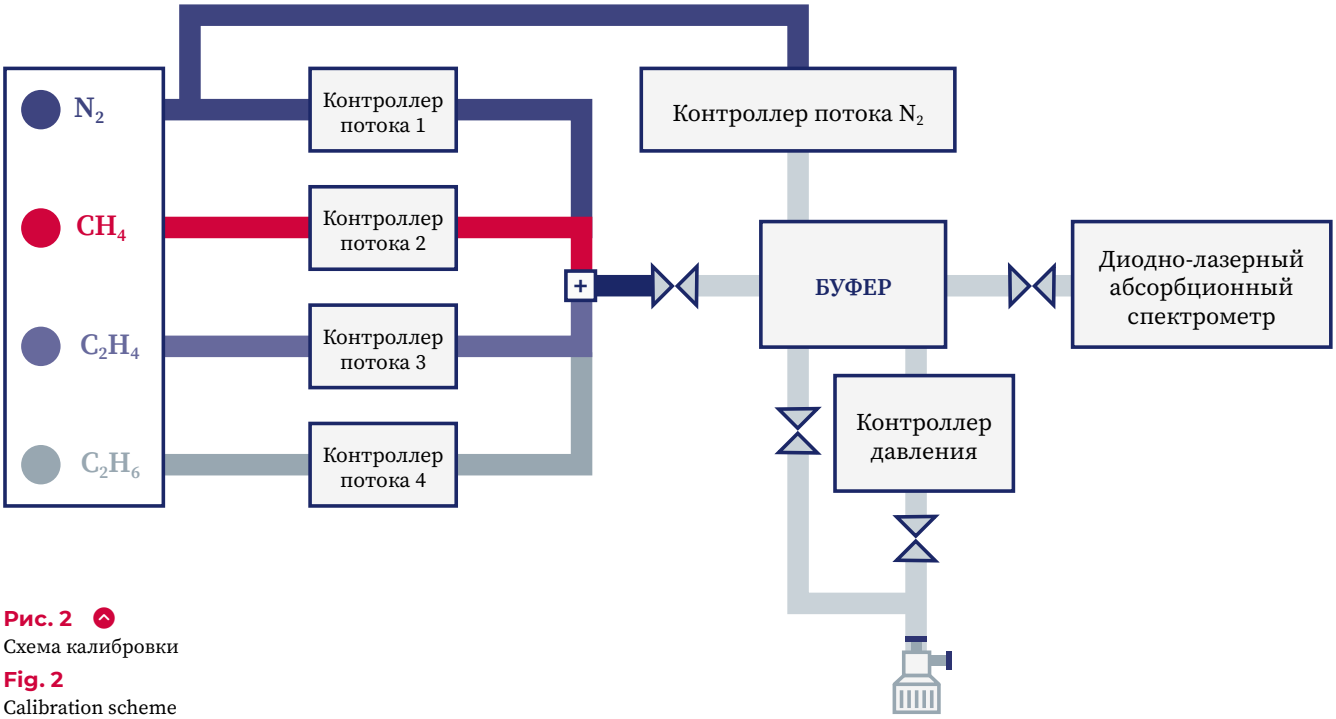



**Рис. 2**
Схема калибровки

**Fig. 2**
Calibration scheme

Лазерная ячейка состоит из двух сферических зеркал с алюминиевым покрытием по маске. Между ними 37 раз отражается лазерное излучение, которое заводится через оптическое волокно. Лазерная ячейка заполняется газом через газовый штуцер, а давление определяется с помощью датчика. Волоконный коллиматор преобразует лазерное излучение из волокна в параллельный луч с минимальной расходимостью.

Стенд калибровки (рис. 2) представляет собой газовые баллоны, подключенные к контроллерам потоков. Данные контроллеры управляются с помощью МХМ, который предоставляет на выходе смешанный газовый поток. Ошибка смешивания МХМ составляет не более 0,5 %. Помимо детектируемых газов используется газ $N_2$, который не поглощается на длинах волн, используемых в выбранном спектрометре.

Основная задача калибровки — задать точную концентрацию в лазерной ячейке и откалибровать спектрометр по заданным показателям. Была разработана программа на языке программирования Python, которая осуществляет управление всеми клапанами, датчиками, прибором смешения, спектрометром и контроллерами в автоматическом режиме.

Первоначальный этап работы заключается в промывке всего стенда калибровки азотом. После установления требуемого давления газ откачивается до вакуума. После промывания в буфере стенда создается газовая смесь. Затем открывается клапан между лазерной ячейкой и буфером, и часть газовой смеси переходит в лазерную ячейку. С помощью датчика давления в лазерной ячейке устанавливается необходимое давление, включается требуемый лазер, и начинается измерение спектра.

В качестве экспериментального спектрометра выступал откалиброванный прибор «Звезда» для определения точности смешения газовой смеси. Измерения проходили с использованием смеси газов $N_2$, $CH_4$, $C_2H_4$, $C_2H_6$. В программу загружался список концентраций и выполнялись измерения. Результаты измерений приведены в табл. 1–2.

Экспериментальная проверка на смесях $N_2$, $CH_4$, $C_2H_4$, $C_2H_6$ подтвердила стабильность работы метода при различных значениях давления (50–200 гПа). Наибольшая точность достигнута при низких значениях (погрешность ≤ 0,75 %), что связано с уменьшением эффекта уширения спектральных линий.

**Таблица 1**
Результаты измерений смеси газов $N_2$ и $CH_4$

**Table 1**
Results of measurements of $N_2$ and $CH_4$ gas mixture

| Давление, гПа | Концентрация, млн$^{-1}$ | | | | Погрешность, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | заданная | | измеренная | | |
| | $N_2$ | $CH_4$ | $N_2$ | $CH_4$ | |
| 200 | 999 800 | 200 | 999 803 | 197 | 1,50 |
| 100 | 999 800 | 200 | 999 802 | 198 | 1,00 |
| 50 | 999 800 | 200 | 999 799 | 201 | 0,50 |
| 200 | 999 500 | 500 | 999 509 | 491 | 1,80 |
| 100 | 999 500 | 500 | 999 507 | 493 | 1,40 |
| 50 | 999 500 | 500 | 999 495 | 505 | 1,00 |
| 200 | 999 000 | 1000 | 999 018 | 982 | 1,80 |
| 100 | 999 000 | 1000 | 999 009 | 991 | 0,90 |
| 50 | 999 000 | 1000 | 999 002 | 998 | 0,20 |
| 200 | 998 000 | 2000 | 998 028 | 1972 | 1,40 |
| 100 | 998 000 | 2000 | 998 019 | 1981 | 0,95 |
| 50 | 998 000 | 2000 | 998 011 | 1989 | 0,55 |
| 200 | 995 000 | 5000 | 995 089 | 4911 | 1,78 |
| 100 | 995 000 | 5000 | 995 069 | 4931 | 1,38 |
| 50 | 995 000 | 5000 | 995 031 | 4969 | 0,62 |
| 200 | 990 000 | 10 000 | 990 012 | 9988 | 0,12 |
| 100 | 990 000 | 10 000 | 989 999 | 10 001 | 0,01 |
| 50 | 990 000 | 10 000 | 989 925 | 10 075 | 0,75 |

**Таблица 2**
Результаты измерений смеси газов $N_2$, $CH_4$, $C_2H_4$, $C_2H_6$

**Table 2**
Results of measurements of the mixture of gases $N_2$, $CH_4$, $C_2H_4$, $C_2H_6$

| Давление, гПа | Концентрация, млн$^{-1}$ | | | | | | | | Погрешность, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | заданная | | | | измеренная | | | | |
| | $N_2$ | $CH_4$ | $C_2H_4$ | $C_2H_6$ | $N_2$ | $CH_4$ | $C_2H_4$ | $C_2H_6$ | |
| 200 | 990 797 | 9000 | 203 | 0 | 990 858 | 8947 | 195 | 0 | 0,66 |
| 100 | 990 797 | 9000 | 203 | 0 | 990 841 | 8961 | 198 | 0 | 0,48 |
| 50 | 990 797 | 9000 | 203 | 0 | 990 774 | 9021 | 205 | 0 | 0,25 |
| 200 | 989 797 | 0 | 203 | 10000 | 989 912 | 0 | 196 | 9892 | 1,13 |
| 100 | 989 797 | 0 | 203 | 10000 | 989 874 | 0 | 197 | 9929 | 0,75 |
| 50 | 989 797 | 0 | 203 | 10000 | 989 868 | 0 | 197 | 9935 | 0,70 |
| 200 | 990 799 | 9000 | 0 | 201 | 990 933 | 8872 | 0 | 195 | 1,46 |
| 100 | 990 799 | 9000 | 0 | 201 | 990 883 | 8920 | 0 | 197 | 0,91 |
| 50 | 990 799 | 9000 | 0 | 201 | 990 874 | 8918 | 0 | 208 | 0,82 |
| 200 | 989 799 | 0 | 10000 | 201 | 989 951 | 0 | 9856 | 193 | 1,49 |
| 100 | 989 799 | 0 | 10000 | 201 | 989 861 | 0 | 9941 | 198 | 0,61 |
| 50 | 989 799 | 0 | 10000 | 201 | 989 866 | 0 | 9930 | 204 | 0,66 |

# 3 Результаты и обсуждение

В данной работе предложен полностью автоматизированный метод калибровки диодно-лазерных абсорбционных спектрометров, устраняющий влияние человеческого фактора и обеспечивающий стандартизацию процесса для серийного производства. Разработанный подход основан на использовании эталонных

газовых смесей, алгоритмов адаптивной настройки лазерных параметров и автоматизированной обработки спектральных данных.

Предлагаемый метод демонстрирует значительные преимущества по сравнению с существующими аналогами, что подтверждается экспериментальными данными. Так, в работе [14] разработана установка для онлайн-детектирования шести газов ($CH_4$, $C_2H_4$, $C_2H_6$, $C_2H_2$, CO, $CO_2$) в трансформаторном масле, однако калибровочные эксперименты выполнялись в лабораторных условиях вручную. В отличие от данного подхода, предложенный метод полностью автоматизирует процесс калибровки, а полученная погрешность калибровки < 2 % является оптимальным балансом между точностью и экономической эффективностью, что особенно важно для промышленного внедрения.

Автоматизация калибровки сокращает время настройки прибора, что критично для серийного производства спектрометров и экспресс-диагностики в энергетике.

Метод автоматической калибровки, как и подход, предложенный в работе [15], направлен на устранение этапа ручной калибровки и повышение точности. Если рассмотренное выше решение фокусируется на аппаратно-алгоритмической автоматизации для промышленных спектрометров, то в статье [15] демонстрируется принципиально иной путь — интеграция диодно-лазерной абсорбционной спектроскопии с методом из другой научной дисциплины для создания абсолютно нового подхода. Оба способа подчеркивают, что будущее диодно-лазерной абсорбционной спектроскопии связано с междисциплинарной интеграцией и полной автоматизацией измерительных процессов.

## 4 Выводы

Предложенный в данной статье метод открывает новые возможности для массового производства диодно-лазерных абсорбционных спектрометров, сочетая точность, сопоставимую с лабораторными системами, и экономичность, критически важную для промышленности. При дальнейшем развитии технологии рекомендуется добавление других газов для смешивания [$CH_3OH$, $C_2H_5OH$].

**библиография**


1. Dai J., Luo B., Shen X., et al. A Review of Optical Gas Sensing Technology for Dissolved Gas Analysis in Transformer Oil // Frontiers in Physics. 2025. Vol. 13. P. 1547563. DOI:10.3389/fphy.2025.1547563.
2. Gazizov I., Pinto D., Moser H., et al. Absorption and Dispersion: In Search of a Versatile Spectroscopic Technique // Sensors and Actuators B: Chemical. 2025. Vol. 436. P. 137688. DOI:10.1016/j.snb.2025.137688.
3. Shen X., Hu L., Gao Y., et al. Monitoring of Multi-component Gas Concentration in Coal Mine Based on TDLAS Technology (Invited) // Acta Photonica Sinica. 2024. Vol. 53. Iss. 10. P. 1053410. DOI:10.3788/gzxb20245310.1053410.
4. Zhang Y., Shao L., Feng S., et al. Development of Field-Deployable TDLAS Analyzer for High Precision Measurements of $CO_2$ and $H_2O$ Flux // Measurement. 2026. Vol. 266. P. 120516. DOI:10.1016/j.measurement.2026.120516.
5. Wang W.F., Yang B., Liu H.F., et al. A Multiline Fitting Method for Measuring Ethylene Concentration Based on WMS-2f/1f // Scientific Reports. 2023. Vol. 13. P. 15302. DOI:10.1038/s41598-023-42398-2.
6. Ji W., Lü X., Hu W., et al. Application of TDLAS Technology to Multicomponent Detection in Olefin Production Process // Optics and Precision Engineering. 2018. Vol. 26. Iss. 8. P. 1837–1845. DOI:10.3788/OPE.20182608.1837.
7. Wang L., Zhang T., Zhou Y., et al. Cross-Interference Correction for Multi-gas TDLAS Detection // Proceedings of SPIE – Advanced Fiber Laser Conference (AFL2023). Vol. 13104. Shenzhen, China, 2024. P. 131042P. DOI:10.1117/12.3023160.
8. Zhang J., Zhu Y., Chen J.Q., et al. Study on Online Self-Calibration Technique for Trace Gas Analyzer Based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy // Spectroscopy and Spectral Analysis. 2010. Vol. 30. Iss. 4. P. 1030–1034. DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2010)04-1030-05.

9. Wang W., Wang Z., Chao X. Gaussian Process Regression for Direct Laser Absorption Spectroscopy in Complex Combustion Environments // Optics Express. 2021. Vol. 29. Iss. 12. P. 17926–17939. DOI:10.1364/OE.425662.
10. Wang Y.S., Chen S.X., Kong Q.M., et al. Research on CO Concentration Detection Based on Deep Learning and TDLAS Technology // Optics and Lasers in Engineering. 2024. Vol. 181. P. 108420. DOI:10.1016/j.optlaseng.2024.108420.
11. Li H., Ren T., Zhao C. A Physics-Informed Neural Network for Non-Linear Laser Absorption Tomography // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2025. Vol. 330. P. 109229. DOI:10.1016/j.jqsrt.2024.109229.
12. Wang R., Yu P., Huang T., et al. Measurement of Engine Exhaust Plume Temperature and Concentration Distributions with Tomographic Absorption Spectroscopy and Learning-Based Absorbance Recovery // Fuel. 2024. Vol. 377. P. 132775. DOI:10.1016/j.fuel.2024.132775.
13. Tu R., Gu J., Zeng Y., et al. Development and Validation of a Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy System for Hot Gas Flow and Small-Scale Flame Measurement // Sensors. 2022. Vol. 22. Iss. 17. P. 6707. DOI:10.3390/s22176707.
14. Chen Y., Wang Z., Li Z., et al. Development of an Online Detection Setup for Dissolved Gas in Transformer Insulating Oil // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Iss. 24. P. 12149. DOI:10.3390/app11241249.
15. Lu J., Shen C., Zhou Z., et al. A Calibration-Free, Non-Invasive, and Accurate Total Viable Count Detection Method Based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy Combined with Most Probable Number Counting // Optics and Lasers in Engineering. 2024. Vol. 173. P. 107899. DOI:10.1016/j.optlaseng.2023.107899.

## авторы

**Терин Михаил Алексеевич**
ООО «БО-ЭНЕРГО», Москва, Россия;
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра прикладной оптики, факультет оптического приборостроения

**Филонов Александр Сергеевич**
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра прикладной оптики, факультет оптического приборостроения
канд. техн. наук, доцент

**Поступила 24.06.2025. Принята к публикации 20.02.2026. Опубликована 27.02.2026.**

UDC 543.4
DOI:10.30533/GiA-2026-011

CC BY

# Automatic Calibration of Laser Spectrometer for Gas Monitoring: Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy Based Approach

**Mikhail A. Terin**[1,2] ✉, **Aleksander S. Filonov**[1]

[1] Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
[2] BO-ENERGO LLC, Moscow, Russia
✉ kresh80@mail.ru

**citation** Terin MA, Filonov AS. Automatic Calibration of Laser Spectrometer for Gas Monitoring: Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy Based Approach. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2026;70(1): 174–183. DOI:10.30533/GiA-2026-011.

**keywords** tunable diode laser absorption spectroscopy analysis, gas monitoring, laser spectroscopy, automatic calibration

**abstract** The accuracy of gas concentration measurements using a laser spectrometer critically depends on the quality of its calibration. In mass production of spectrometers, traditional calibration methods that require operator intervention lead to subjective errors, increased setup time, and instability of results. In this paper, a fully automated method for calibrating tunable diode laser absorption spectrometers is proposed, eliminating the influence of the human factor and ensuring standardization of the process for mass production. The method is based on the use of reference gas mixtures with precisely known concentrations, algorithms for adaptive adjustment of laser parameters, and automated processing of spectral data. The proposed method for automatic calibration of tunable diode laser absorption spectrometers allows standardizing the process for mass production and increasing the reliability of measurements for $CH_4$, $C_2H_4$, and $C_2H_6$ gases. Experimental testing on $N_2/CH_4$ mixtures showed that the proposed approach provides a calibration error of no more than 2 %, which meets the requirements of industrial monitoring. The method opens up new opportunities for the mass production of diode laser absorption spectrometers. The article also presents the prospects for the development of technology.

**references**

1. Dai J, Luo B, Shen X, et al. A Review of Optical Gas Sensing Technology for Dissolved Gas Analysis in Transformer Oil. *Frontiers in Physics.* 2025;13: 1547563. DOI:10.3389/fphy.2025.1547563.

2. Gazizov I, Pinto D, Moser H, et al. Absorption and Dispersion: In Search of a Versatile Spectroscopic Technique. ***Sensors and Actuators B: Chemical.*** 2025;436: 137688. DOI:10.1016/j.snb.2025.137688.
3. Shen X, Hu L, Gao Y, et al. Monitoring of Multi-component Gas Concentration in Coal Mine Based on TDLAS Technology (Invited). ***Acta Photonica Sinica.*** 2024;53(10): 1053410. DOI:10.3788/gzxb20245310.1053410.
4. Zhang Y, Shao L, Feng S, et al. Development of Field-Deployable TDLAS Analyzer for High Precision Measurements of $CO_2$ and $H_2O$ Flux. ***Measurement.*** 2026;266: 120516. DOI:10.1016/j.measurement.2026.120516.
5. Wang WF, Yang B, Liu HF, et al. A Multiline Fitting Method for Measuring Ethylene Concentration Based on WMS-2f/1f. ***Scientific Reports***. 2023;13: 15302. DOI:10.1038/s41598-023-42398-2.
6. Ji W, Lü X, Hu W, et al. Application of TDLAS Technology to Multicomponent Detection in Olefin Production Process. ***Optics and Precision Engineering***. 2018;26(8): 1837–1845. DOI:10.3788/OPE.20182608.1837.
7. Wang L, Zhang T, Zhou Y, et al. Cross-Interference Correction for Multi-gas TDLAS Detection. ***Proceedings of SPIE – Advanced Fiber Laser Conference (AFL2023).*** Vol. 13104. Shenzhen, China, 2024. P. 131042P. DOI:10.1117/12.3023160.
8. Zhang J, Zhu Y, Chen JQ, et al. Study on Online Self-Calibration Technique for Trace Gas Analyzer Based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy. ***Spectroscopy and Spectral Analysis.*** 2010;30(4): 1030–1034. DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2010)04-1030-05.
9. Wang W, Wang Z, Chao X. Gaussian Process Regression for Direct Laser Absorption Spectroscopy in Complex Combustion Environments. ***Optics Express***. 2021;29(12): 17926–17939. DOI:10.1364/OE.425662.
10. Wang YS, Chen SX, Kong QM, et al. Research on CO Concentration Detection Based on Deep Learning and TDLAS Technology. ***Optics and Lasers in Engineering.*** 2024;181: 108420. DOI:10.1016/j.optlaseng.2024.108420.
11. Li H, Ren T, Zhao C. A Physics-Informed Neural Network for Non-Linear Laser Absorption Tomography. ***Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.*** 2025;330: 109229. DOI:10.1016/j.jqsrt.2024.109229.
12. Wang R, Yu P, Huang T, et al. Measurement of Engine Exhaust Plume Temperature and Concentration Distributions with Tomographic Absorption Spectroscopy and Learning-Based Absorbance Recovery. ***Fuel.*** 2024;377: 132775. DOI:10.1016/j.fuel.2024.132775.
13. Tu R, Gu J, Zeng Y, et al. Development and Validation of a Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy System for Hot Gas Flow and Small-Scale Flame Measurement. ***Sensors***. 2022;22(17): 6707. DOI:10.3390/s22176707.
14. Chen Y, Wang Z, Li Z, et al. Development of an Online Detection Setup for Dissolved Gas in Transformer Insulating Oil. ***Applied Sciences***. 2021;11(24): 12149. DOI:10.3390/app11241249.
15. Lu J, Shen C, Zhou Z, et al. A Calibration-Free, Non-Invasive, and Accurate Total Viable Count Detection Method Based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy Combined with Most Probable Number Counting. ***Optics and Lasers in Engineering***. 2024;173: 107899. DOI:10.1016/j.optlaseng.2023.107899.


## authors


**Mikhail A. Terin**
BO-ENERGO LLC, Moscow, Russia;
Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Applied Optics, Faculty of Optical Instrumentation

**Aleksander S. Filonov**
Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Applied Optics, Faculty of Optical Instrumentation
PhD in Engineering, Associate Professor


**Submitted: June 24, 2025. Accepted: February 20, 2026. Published: February 27, 2026.**