70/3 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

70/3 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 30.06.2026.
Гарнитуры Source Serif Pro, Montserrat.
Формат 60×90 1/8.
Бумага мелованная.
Печать цифровая.
Объем 20,75 усл. печ. л.
Тираж 500 экз.
Заказ № 17. 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 30.06.2026.
Fonts Source Serif Pro, Montserrat.
Format 60×90 1/8.
Coated paper.
Digital print.
20.75 printed sheet.
500 copies. Order No. 17.

Editorial Office
Department of Editorial
and Publishing Activities
and Scientometrics

Printed by PrintSide
printside.ru

Содержание

геодезия	**Валов Г.Е., Вшивкова О.В.** Методика учета влияния вертикальной рефракции по градиентным геодезическим измерениям при одностороннем тригонометрическом нивелировании	**8**
	Куприянов А.О., Коробова А.С., Морозов Д.А., Замогильный Д. Разработка методики и технологии автоматизированного периодического уравнивания сети постоянно действующих спутниковых геодезических станций	**23**
аэрокосмические исследования земли, фотограмметрия	**Ларионов Р.В., Хрящев В.В., Приоров А.Л.** Комбинированный метод сегментации сельхозугодий на радиолокационных изображениях с использованием фильтрации спекл-шума и алгоритмов глубокого машинного обучения	**42**
геоинформатика, картография	**Кухаренко Е.Л.** Одномоментная визуализация геоданных в реальном времени через единое программное решение без программирования	**55**
	Родионова Ю.В., Тарарин А.М. Формирование экосистемы геоаналитики: вызовы и решения в развитии геомаркетинга	**70**
землеустройство, кадастр и мониторинг земель	**Верхотуров А.А.** Система контролируемых показателей мониторинга состояния земель в районах активного вулканизма	**84**
	Кузовлев Н.А. Основные положения системы интеграции пунктов геодезического разбивочного обоснования в кадастровую и землеустроительную деятельность	**97**
	Горева А.Ю. Классификация методов анализа пространственных данных	**117**
оптические и оптико-электронные приборы и комплексы	**Шарапов И.С., Верба Г.Е.** Проектирование трехосевой сканирующей лазерной системы для установок селективного лазерного плавления: от конструкции зеркал до расчета динамической фокусировки	**130**
	Лобанов А.А. Архитектура и функциональная модель работы бортового комплекса оптической навигации и посадки космического летательного аппарата на поверхность малых тел Солнечной системы	**151**
хроника	**Международная научная онлайн-конференция «Пространственные данные: наука и технологии — 2026»**	**164**

Contents

geodesy	**Valov G.E., Vshivkova O.V.** The Method of Accounting for the Influence of Vertical Refraction by Gradient Geodetic Measurements with Direct Trigonometric Levelling	**8**
	Kupriyanov A.O., Korobova A.S., Morozov D.A., Zamogilny D. Development of a Methodology and Technology for Automated Periodic Adjustment of a Network of Permanent Satellite Geodetic Stations	**23**
earth aerospace survey, photogrammetry	**Larionov R.V., Khryaschev V.V., Priorov A.L.** Hybrid Approach to Agricultural Land Segmentation on Radar Images Integrating Despeckling and Deep Learning	**42**
geoinformatics, cartography	**Kukharenko E.L.** About Visualizing Various Data in Real Time Through One Software Application without Programming	**55**
	Rodionova Ju.V, Tararin A.M. Building of the Geoanalytics Ecosystem: Challenges and Solutions in the Development of Geomarketing	**70**
land management, cadastre and land monitoring	**Vekhoturov A.A.** System of Controlled Indicators for Monitoring the State of Lands in Areas of Active Volcanism	**84**
	Kuzovlev N.A. Basic Provisions of the System for Integrating Geodetic Survey Points into Cadastral and Land Management Activities	**97**
	Goreva A.Yu. Classification of Spatial Data Analysis Methods	**117**
optical and optoelectronic devices and systems	**Sharapov I.S., Verba G.E.** The Design of a Three-axis Laser Scanning System for Selective Laser Melting Systems: From Mirror Design to Dynamic Focus Calculation	**130**
	Lobanov A.A. Architecture and Functional Model of the Onboard Optical Navigation and Landing System for Spacecraft on Small Solar System Bodies	**151**
chronicle	**International Scientific Online Conference "Spatial Data: Science and Technology 2026"**	**164**

УДК 528.024.4
DOI:10.30533/GiA-2026-023

CC BY

Методика учета влияния вертикальной рефракции по градиентным геодезическим измерениям при одностороннем тригонометрическом нивелировании

Г.Е. Валов[1,2] ✉, **О.В. Вшивкова**[1]

[1] Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия
[2] Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия
✉ georgevalov@mail.ru

цитирование Валов Г.Е., Вшивкова О.В. Методика учета влияния вертикальной рефракции по градиентным геодезическим измерениям при одностороннем тригонометрическом нивелировании // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 3. С. 8–22. DOI:10.30533/GiA-2026-023.

ключевые слова одностороннее тригонометрическое нивелирование, вертикальная рефракция, коэффициент рефракции, градиентные геодезические измерения

аннотация В работе представлена методика учета влияния вертикальной рефракции по градиентным геодезическим измерениям при одностороннем тригонометрическом нивелировании, включающая разработанные авторами алгоритм определения коэффициента рефракции, методические приемы производства градиентных геодезических измерений, рациональную процедуру производства угловых измерений на нескольких уровнях, программу полевых работ. С целью повышения точности учета влияния вертикальной рефракции усовершенствован алгоритм определения коэффициента рефракции, основанный на решении по методу Монте-Карло системы нелинейных уравнений, описывающих изменение угла рефракции с высотой. Описан полевой эксперимент, позволивший оценить эффективность усовершенствованного алгоритма определения коэффициента рефракции, работоспособность предложенного подхода к учету влияния вертикальной рефракции для различных типов подстилающей поверхности и в широком спектре высот визирного луча над ней, сформулировать требования к реализации методики, обеспечивающие определение превышений методом тригонометрического нивелирования с точностью, соответствующей III и IV классам геометрического нивелирования. Разработанная методика учета влияния вертикальной рефракции по градиентным геодезическим измерениям при одностороннем тригонометрическом нивелировании позволяет свести к минимуму затраты на введение поправки за влияние вертикальной рефракции и реализуется с использованием только стандартного геодезического оборудования.

1 Введение

Основным фактором, ограничивающим область применения тригонометрического нивелирования в геодезическом производстве, является вертикальная рефракция (ВР) [1]. Традиционно для учета влияния ВР используется коэффициент рефракции k [2]. Для обеспечения точности геометрического нивелирования III класса коэффициент рефракции k необходимо определять с точностью 0,06. В геодезической практике для учета влияния ВР используют стандартный коэффициент рефракции 0,13–0,14[1]. Между тем в реальной атмосфере коэффициент рефракции изменяется в широких пределах. По данным, приведенным В.Е. Дементьевым[2], на трассе длиной 2 км со средней высотой визирного луча над подстилающей поверхностью (ПП) 1,5 м коэффициент рефракции k перед восходом солнца был равен +5,25, а днем принимал отрицательные значения, близкие к −4,72.

Исследователи предлагают целый ряд технологий, методик и алгоритмов, позволяющих учесть или ослабить влияние ВР. Среди них визуальные[3,4,5] и автоматизированные [3, 4] турбулентные методы; дисперсионные методы[6,7], которые на сегодняшний день не вышли за рамки лабораторных и полевых экспериментов; метеорологические методы, основанные на теории подобия Монина — Обухова [5–7]; геодезические методы, представленные различными вариациями метода двустороннего тригонометрического нивелирования[8,9,10] [8], методами геодезического базиса[11] и геодезической службы рефракции[4], методиками нивелирования из середины с учетом влияния ВР [9–17], а также методом обратного преобразования (инверсии) коэффициента рефракции [18].

В работе [19] предложены следующие критерии оценки эффективности методик учета и ослабления влияния ВР на результаты тригонометрического нивелирования: соответствие требуемой точности; время, затрачиваемое на производство полевых измерений и обработку полученных результатов (оперативность); стоимость реализации; ограничение условий применения; квалификация исполнителей. По указанным критериям выполнен сравнительный анализ методов, удовлетворяющих точностным требованиям III и IV классов геометрического нивелирования. Сделан вывод, что ни один из рассмотренных методов не удовлетворяет всем критериям. Обоснована возможность применения технологии эффективного учета влияния приземного слоя атмосферы для рационального учета влияния ВР [19]. Данная технология обеспечивает оптимальное соотношение между затратами на учет влияния ВР и полученной точностью высотных определений. Базовыми положениями технологии

1 Большаков В.Д., Голубев А.Н. Справочник геодезиста. М.: Недра, 1985. 455 с.

2 Дементьев В.Е. Современная геодезическая техника и ее применение: учеб. пособие для вузов. 2-е изд. М.: Академический Проект, 2008. 591 с.

3 Виноградов В.В., Сухов Г.Н., Медовиков А.С. и др. Определение рефракции при геодезическом нивелировании по размытию изображения регулярных структур // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 1985. № 3. С. 15–18.

4 Brunner F.K. Geodetic Refraction: Effects of Electromagnetic Wave Propagation trough the Atmosphere. Berlin: Springer, 1984. 216 p.

5 Вритте Б., Деубен Д. Возможность применения цифровой камеры для определения вертикальной рефракции // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2001. № 2. С. 130–139.

6 Прилепин М.Т., Голубев А.Н. Инструментальные методы геодезической рефрактометрии // Итоги науки и техники. Серия: Геодезия и аэрофотосъемка. М.: ВИНИТИ, 1979. Т. 15. 91 с.

7 Вшивков В.Ф. О компенсационном способе учета влияния рефракции при геодезических измерениях // Геодезия и картография. 1974. № 10. С. 28–33.

8 Лазарев Е.Г. Тригонометрическое нивелирование и гравиметрические исследования в Антарктиде. М.: Наука, 1970. 75 с.

9 Островская С.А. Учет вертикальной рефракции на основании взаимных и эквивалентных высот луча // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 1984. № 3. С. 51–60.

10 Менухов И.И. О точности учета вертикальной рефракции по одновременно измеренным метеоэлементам и зенитным расстояниям // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 1983. № 4. С. 48–52.

11 Никольский Е.К. О сетях с рефракционными базисами // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1973. Вып. 18. С. 58–60.

эффективного учета влияния приземного слоя атмосферы являются «геодезическая» модель атмосферы и принцип определения параметров модели по градиентным геодезическим и (или) метеорологическим измерениям. С точки зрения геодезического производства наиболее перспективным является геодезический способ определения параметров «геодезической» модели атмосферы, т. к. для его реализации необходимо только массово выпускаемое геодезическое оборудование. Еще одно существенное преимущество геодезического способа состоит в том, что определенные по результатам угловых измерений значения параметров «геодезической» модели являются результирующими для трассы.

В работе [19] представлен разработанный авторами алгоритм учета влияния ВР по градиентным геодезическим измерениям, основанный на весовой реализации метода Монте-Карло. Исходными данными для работы алгоритма служат расстояния и вертикальные углы, измеренные как минимум на четырех измерительных уровнях.

В работе [20] проанализированы факторы формирования ВР, подлежащие учету при организации градиентных геодезических измерений. Было установлено, что эффективная методика учета влияния ВР на результаты тригонометрического нивелирования должна обеспечивать учет следующих факторов: наличия точек перегиба температурной стратификации, особенно на линиях, покрытых растительностью; изменения типа ПП вдоль линии визирования; изменения высоты визирного луча над ПП. В той же статье [20] описаны принципиально проработанные методические приемы производства градиентных геодезических измерений, рациональная процедура производства угловых измерений на нескольких уровнях и основные этапы программы полевых работ при реализации геодезического способа определения параметров «геодезической» модели атмосферы. Результаты полевой апробации показали эффективность геодезического способа определения параметров используемой модели атмосферы для учета влияния ВР в тригонометрическом нивелировании.

В данной работе представлены результаты дальнейших исследований, цель которых состоит в разработке методики учета влияния ВР по градиентным геодезическим измерениям при одностороннем тригонометрическом нивелировании. Для достижения указанной цели были решены следующие задачи:

1) усовершенствован алгоритм определения коэффициента рефракции по градиентным геодезическим измерениям с целью повышения точности высотных определений;
2) проведена предварительная апробация усовершенствованного алгоритма по результатам ранее выполненных измерений;
3) организован и реализован новый полевой эксперимент.

Новый эксперимент позволил:

- оценить работоспособность предложенного подхода к учету влияния ВР [19, 20] для разных типов ПП;
- оценить точность определения превышений методом одностороннего тригонометрического нивелирования с использованием усовершенствованного алгоритма определения коэффициента рефракции;
- рекомендовать оптимальное количество измерительных уровней, обеспечивающее точность III класса геометрического нивелирования;
- сравнить точность полученных результатов с точностью геометрического нивелирования III класса и с точностью, обеспечиваемой при использовании стандартного коэффициента рефракции;
- сформировать методику учета влияния ВР по градиентным геодезическим измерениям при одностороннем тригонометрическом нивелировании, включающую усовершенствованный алгоритм определения коэффициента рефракции по градиентным геодезическим измерениям; методические приемы производства градиентных геодезических измерений; процедуру производства угловых измерений на нескольких уровнях; программу полевых работ при реализации геодезического способа определения параметров «геодезической» модели атмосферы.

2 Материалы и методы

2.1 Усовершенствование алгоритма определения коэффициента рефракции по градиентным геодезическим измерениям

В работе [19] представлен алгоритм определения коэффициента рефракции по градиентным геодезическим измерениям при одностороннем тригонометрическом нивелировании, основанный на применении весовой реализации метода Монте-Карло (*англ.* weighted importance sampling). В основе алгоритма лежит исходная система нелинейных уравнений, связывающих отношения приращений угла рефракции $\delta r_{1\to j}/\delta r_{1\to 2}$ на нескольких измерительных уровнях с параметрами «геодезической» модели. Приращения рефракции $\delta r_{1\to j}$ вычисляются как разность измеренной $(\Delta\nu_{1\to j})_{изм}$ и теоретической $(\Delta\nu_{1\to j})_{теор}$ разностей углов наклона ν.

При использовании метода Монте-Карло осуществляется случайная выборка пар неизвестных параметров b (коэффициент обмена, характеризующий динамику рабочего слоя воздуха) и $z_{экв}$ (эквивалентная высота визирного луча), значения каждой пары подставляются в исходную систему уравнений, по каждому уравнению вычисляется истинное отклонение Δ, затем определяется средняя квадратическая погрешность (СКП) каждой пары b и $z_{экв}$ по формуле Гаусса. СКП пар b и $z_{экв}$ используются для назначения весов и последующего вычисления наиболее надежных значений параметров b и $z_{экв}$ по формуле среднего весового.

При этом в формуле Гаусса отклонения, полученные по каждому уравнению исходной системы, принимаются равноточными, что не позволяет учесть степень доверия к отношениям $\delta r_{1\to j}/\delta r_{1\to 2}$, которая зависит от точности измерения углов наклона. Предлагаемое усовершенствование алгоритма заключается в использовании взвешенного варианта оценивания. Для этого необходимо оценить точность величин $\delta r_{1\to j}\ /\ \delta r_{1\to 2}$. Воспользуемся обобщенной теоремой оценки точности[12]

1
$$m_{\left(\frac{\delta r_{1\to j}}{\delta r_{1\to 2}}\right)} = \sqrt{\left(\frac{1}{\delta r_{1\to 2}}\right)^2 m^2_{\delta r_{1\to j}} + \left(\frac{-\delta r_{1\to j}}{\delta r^2_{1\to 2}}\right)^2 m^2_{\delta r_{1\to 2}}},$$

при этом $m_{\delta r_{1\to 2}}$ и $m_{\delta r_{1\to j}}$ — СКП измеренных приращений рефракции $\delta r_{1\to 2}$ и $\delta r_{1\to j}$, вычисленные по формуле

2
$$m_{\delta r_{1\to j}} = \sqrt{m^2_{\nu_1} + m^2_{\nu_j}},$$

где m_{ν_1} и m_{ν_j} — СКП измеренных углов наклона на первом и j-м уровнях, определенные по равноточной формуле Бесселя

3
$$m_\nu = \sqrt{\frac{[\nu_s - \nu_{cp}]^2}{r-1}},$$

в которой ν_s — значение угла наклона ν в приеме с номером s;
ν_{cp} — среднее значение угла ν из приемов;
r — количество приемов.

Примем за СКП единицы веса μ среднее из $m_{\delta r_{1\to j}/\delta r_{1\to 2}}$. Назначим веса отношений $\delta r_{1\to j}/\delta r_{1\to 2}$ по следующей формуле

4
$$p_{\left(\frac{\delta r_{1\to j}}{\delta r_{1\to 2}}\right)} = \frac{\mu^2}{m^2_{\left(\frac{\delta r_{1\to j}}{\delta r_{1\to 2}}\right)}}.$$

Зная весовые коэффициенты величин $\delta r_{1\to j}/\delta r_{1\to 2}$, можно назначить веса каждой пары значений $b_i z_i$, используя СКП, вычисленные по формуле

12 Теория математической обработки геодезических измерений: учеб. пособие для вузов / под общ. ред. Ю.И. Маркузе. М.: Академический Проект, 2020. 247 с.

5

$$m_{b_i z_i} = \sqrt{\frac{\left[p_{\left(\frac{\delta r_{1\to j}}{\delta r_{1\to 2}}\right)} \Delta^2\right]}{n}},$$

где n — количество уравнений в исходной системе.

Дальнейшие этапы алгоритма, представленного в статье [19], остаются неизменными.

2.2 Предварительная апробация усовершенствованного алгоритма определения коэффициента рефракции по градиентным геодезическим измерениям

Предварительная апробация усовершенствованного алгоритма определения коэффициента рефракции по градиентным геодезическим измерениям выполнена по данным описанного в работе [20] полевого эксперимента, который заключался в производстве градиентных геодезических измерений на трех визирных линиях. В табл. 1 представлены измерительные уровни, использованные для вычисления отношений приращений рефракции; весовые коэффициенты отношений $\delta r_{1\to j}/\delta r_{1\to 2}$; истинные отклонения значений коэффициента рефракции, полученных в результате применения усовершенствованного алгоритма $\Delta k_{усов}$ и его исходной версии $\Delta k_{исх}$, от точных значений коэффициента рефракции, вычисленных по результатам геометрического нивелирования.

Согласно данным табл. 1, учет весов отношений приращений рефракции позволяет повысить точность определения коэффициента рефракции.

Таблица 1
Сравнение точности определения коэффициента рефракции по усовершенствованному и исходному алгоритмам

Table 1
Comparison of the accuracy of determining the refraction coefficient using the improved algorithm and original one

Визирная линия	$\delta r_{1\to j}/\delta r_{1\to 2}$	$p_{(\delta r_{1\to j}/\delta r_{1\to 2})}$	$\Delta k_{усов}$	$\Delta k_{исх}$
Родник — Речка	1→3/1→2	1,98	−0,02	0,02
	1→4/1→2	0,77		
	1→5/1→2	0,76		
Родник — Костино	2→4/2→3	1,39	−0,11	−0,13
	2→5/2→3	0,75		
Родник — Швейцария	1→3/1→2	0,53	−0,12	−0,17
	1→4/1→2	0,68		
	1→5/1→2	5,86		

2.3 Предрасчет требований к точности градиентных геодезических измерений при реализации разрабатываемой методики

В работе [19] был выполнен предрасчет требований к точности измерения угла наклона ν, необходимой для обеспечения точности IV класса геометрического нивелирования. Было установлено, что на дистанции длиной 1 км при заданных условиях ($b = 0{,}8$; $z_{экв} = 1{,}5$ м; вертикальный градиент на исходном уровне $(dn/dz)_0 = 0{,}2\times10^{-6}$/м; разность средних высот измерительных уровней $\Delta z_{2-1} = 0{,}25$ м, точность измерения разности высот отражателей 1 мм) угол наклона ν необходимо измерять с СКП 0,5″. Достижение указанной точности возможно при измерении углов наклона четырьмя полными приемами электронным тахеометром с точностью угловых измерений 1″.

Для III класса точности, согласно Инструкции по нивелированию I, II, III, IV классов[13], случайная СКП определения превышения равна 5 мм на 1 км хода. Для достижения таких результатов углы наклона следует измерять с точностью 0,25″. Обозначенную СКП при использовании тахеометра с точностью угловых измерений 1″ обеспечим при измерении углов наклона шестнадцатью приемами. Значительное увеличение числа приемов приведет к увеличению времени наблюдений и необходимости учета временных изменений коэффициента рефракции. Другой, более рациональный подход к обеспечению требуемой точности заключается в увеличении числа измерительных уровней, что позволит получить избыточные измерения.

2.4 Описание эксперимента

Ранее выполненный эксперимент [20] подтвердил соответствие предлагаемой методики требованиям геометрического нивелирования IV класса при использовании исходной (упрощенной) версии вычислительного алгоритма [19]. Измерения производились на пять визирных целей с разностью высот между ними 0,5 м. ПП представляла собой пересеченную местность, поросшую травянистой растительностью, на всех трассах и измерительных уровнях высота визирного луча была значительной (8,5 м и выше).

Второй полевой эксперимент, реализованный в августе 2025 года, был нацелен на апробацию усовершенствованного алгоритма определения коэффициента рефракции по градиентным геодезическим измерениям; оценку работоспособности разрабатываемой методики в различных условиях (над различными типами ПП и в другом диапазоне средних высот визирного луча).

Для указанных целей в Московской области был создан экспериментальный полигон. Схема полигона представлена на рис. 1. Линия Б1–Б2 проходит над бетонной дорогой, линия О1–О2 — над водной поверхностью, линия Р1–Р2 — над растительностью вдоль обочины грунтовой дороги. Таким образом, были охвачены основные типы ПП средней полосы России.

В качестве визирной цели использовалась веха с наклеенными светоотражательными марками. Веха закреплялась в рабочем положении с помощью трипода. Измерения производились на одиннадцать визирных целей с разностью высот между ними 0,25 м.

Предварительно по каждой визирной линии было выполнено геометрическое нивелирование по программе II класса, для чего использовался комплект оборудования, состоящий из цифрового нивелира Trimble DiNi 22, характеризуемого точностью измерения превышения 0,7 мм на километр двойного хода, и инварной рейки LD 12. Характеристики визирных линий экспериментального полигона представлены в табл. 2.

Рис. 1
Схема экспериментального полигона

Fig. 1
Scheme of the test area

13 Инструкция по нивелированию I, II, III, IV классов. М.: ЦНИИГАиК, 2003. 134 с.

Таблица 2
Основные характеристики линий экспериментального полигона

Table 2
Basic characteristics of the test area lines

Линия	$D\square$, м	$h_{геом}$, м	$z_{ср}$, м	Характеристика ПП
Б1–Б2	304,375	1,6799	0,776	Бетонная дорога (вблизи наблюдаемой точки визирный луч проходит в непосредственной близости от ПП, минимальная высота визирного луча над ПП — 17 см)
О1–О2	426,043	−0,1328	4,113	Водная поверхность
Р1–Р2	325,727	−2,7696	1,507	Полевая растительность высотой около 1,0 м

Примечание. $D\square$ — горизонтальное проложение, $h_{геом}$ — результаты геометрического нивелирования II класса, $z_{ср}$ — средневзвешенная высота визирного луча над ПП на нижнем измерительном уровне.

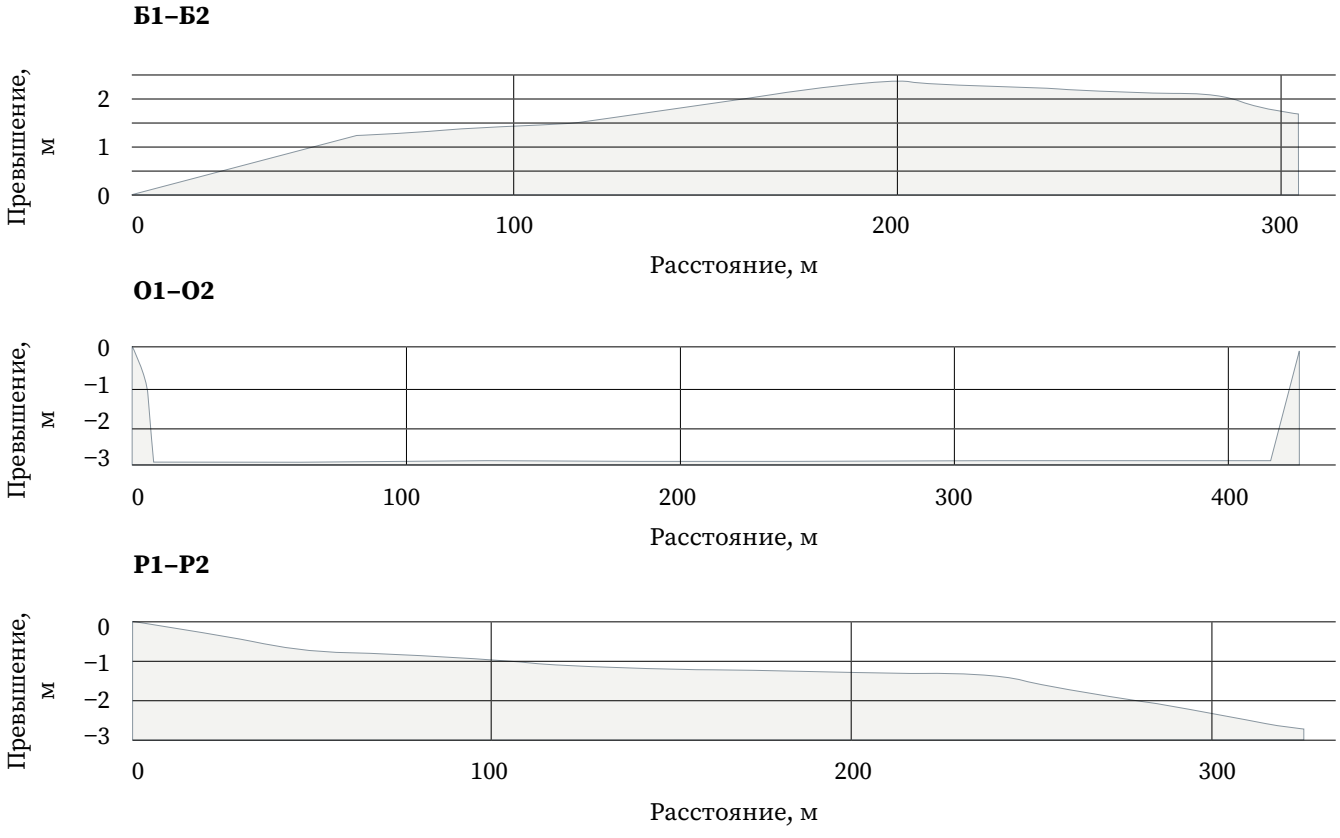
На рис. 2 представлены продольные профили рельефа по каждой визирной линии.

Полевые работы выполнялись в соответствии с разработанной программой [20], включающей следующие этапы: установку и приведение в рабочее положение электронного тахеометра и отражателя; измерение высоты тахеометра и отражателя над ПП; измерение горизонтального проложения D' между пунктами; установку вехи с наклеенными марками на определяемый пункт и измерение высоты визирных целей над ПП; проведение угловых измерений в режиме «Измерение углов». Измерения производились восемью полными приемами электронным тахеометром Leica Geosystems TC1201, характеризуемым точностью измерения вертикального угла 1″, по представленной в работе [20] процедуре производства угловых измерений на нескольких уровнях. Данная процедура позволяет уменьшить влияние временных изменений угла рефракции на точность определения коэффициента рефракции за счет существенного сокращения времени, затрачиваемого на производство угловых измерений.

В результаты тригонометрического нивелирования вводилась поправка за стандартный коэффициент рефракции и коэффициент рефракции, вычисленный с использованием описанного выше усовершенствованного алгоритма определения коэффициента рефракции по градиентным геодезическим измерениям. Измеренные и исправленные превышения были проанализированы на предмет соответствия точности геометрического нивелирования III класса.

Рис. 2
Профили рельефа вдоль визирных линий

Fig. 2
Relief profiles along the sighting lines



3 Результаты

Превышения между исходными и определяемыми пунктами $h_{измер}$ вычислялись по формуле

$$h_{измер} = \overline{D}\cos\overline{z} + i - V + \frac{\overline{D}^2}{2R_{ср}}, \quad (6)$$

где $\overline{D}$ и $\overline{z}$ — средние для приема значения наклонной дальности и зенитного расстояния;
i — высота инструмента;
V — высота визирной цели над определяемым пунктом;
$R_{ср}$ — средний радиус кривизны Земли.

Последнее слагаемое в формуле (6) представляет собой поправку за кривизну Земли.

В свою очередь, исправленное за стандартный коэффициент рефракции превышение вычислялось по формуле

$$h_{k=0,14} = h_{измер} - 0{,}14\frac{\overline{D}^2}{2R_{ср}}. \quad (7)$$

Результаты сравнения точности измеренных превышений и превышений, исправленных за стандартный коэффициент рефракции, с допустимой погрешностью нивелирования III класса представлены в табл. 3.

Таблица 3
Сравнение точности измеренных превышений и превышений, исправленных за стандартный коэффициент рефракции, с допустимой погрешностью нивелирования III класса

Table 3
Comparing of the accuracy of the measured elevation differences and the elevation differences, corrected for the standard refraction coefficient, with the maximum allowable error for the III class of geometric levelling

Линия	D□, м	$\Delta h_{пред}$, мм	Δh, мм	$\Delta h_{k=0,14}$, мм
Б1–Б2	304,375	5,5	11,5	10,5
О1–О2	426,043	6,5	3,4	1,4
Р1–Р2	325,727	5,7	10,9	9,8

Согласно табл. 3, на всех визирных линиях, кроме О1–О2, истинные отклонения измеренных превышений Δh превысили величину допустимой погрешности для III класса геометрического нивелирования $\Delta h_{пред}$. Получение большей точности на линии О1–О2 можно объяснить значительной высотой визирного луча над ПП (более 4 м) и меньшим влиянием угловой рефракции, что характерно для линий, проходящих над водной поверхностью. Кроме того, следует отметить, что на линии О1–О2 высота визирного луча над ПП и тип ПП практически не менялись, т. е. на протяжении всей трассы визирный луч проходил в одинаковых условиях. Введение поправки за стандартный коэффициент рефракции во всех случаях привело к повышению точности тригонометрического нивелирования. Однако на линиях Б1–Б2 и Р1–Р2 истинные отклонения превышения, исправленного за стандартный коэффициент рефракции $\Delta h_{k\,=\,0,14}$, не укладываются в величину допустимой погрешности $\Delta h_{пред}$, на основании чего можно сделать вывод о низкой эффективности использования поправки за стандартный коэффициент рефракции.

Определение коэффициента рефракции по усовершенствованному алгоритму было выполнено по трем комбинациям измерительных уровней: нижние 7 уровней, нижние 9 уровней и все 11 уровней (табл. 4).

В табл. 4 приведены полученные для каждой визирной линии коэффициенты рефракции k и градиенты показателя преломления $grad\ n$, а также истинные отклонения указанных параметров Δk и $\Delta_{grad\ n}$. Представленные численные значения соответствуют первому измерительному уровню.

В измеренные превышения вводилась поправка за полученные коэффициенты рефракции по формуле

$$h_k = h_{измер} - k\frac{\overline{D}^2}{2R_{ср}}. \quad (8)$$

Таблица 4
Определение коэффициента рефракции по результатам градиентных геодезических измерений

Table 4
The refraction coefficient determination based on the results of gradient geodetic measurements

Линия	Уровни	$grad\ n$, 10^{-8}/м	$\Delta_{grad\ n}$, 10^{-8}/м	k	Δk
Б1–Б2	1–7	12,1	−12,7	0,77	−0,81
	1–9	13,2	−11,6	0,84	−0,74
	1–11	14,3	−10,5	0,91	−0,67
О1–О2	1–7	5,3	1,6	0,34	0,10
	1–9	5,3	1,6	0,34	0,10
	1–11	5,0	1,3	0,32	0,08
Р1–Р2	1–7	11,5	−9,1	0,73	−0,58
	1–9	11,6	−8,9	0,74	−0,57
	1–11	13,2	−7,4	0,84	−0,47

Результаты сравнения истинных отклонений превышений, исправленных за определенный по усовершенствованному алгоритму коэффициент рефракции (Δh_k), с допустимой погрешностью нивелирования III класса представлены в табл. 5, которая дополнена истинными отклонениями превышений, исправленных за стандартный коэффициент рефракции ($\Delta h_{k\,=\,0{,}14}$), что позволило оценить точность предлагаемой методики по сравнению с использованием поправки за стандартный коэффициент рефракции 0,14.

Таблица 5
Оценка точности превышений, исправленных за коэффициент рефракции, определенный по усовершенствованному алгоритму

Table 5
The accuracy evaluation of the elevation differences corrected for the refraction coefficient determined by the improved algorithm

Линия	Уровни	D□, м	$\Delta h_{пред}$, мм	Δh, мм	$\Delta h_{k=0,14}$, мм
Б1–Б2	1–7	304,375	5,5	5,9	10,5
	1–9			5,4	
	1–11			**4,9**	
О1–О2	1–7	426,043	6,5	−1,5	1,4
	1–9			−1,5	
	1–11			**−1,2**	
Р1–Р2	1–7	325,727	5,7	4,9	9,8
	1–9			4,8	
	1–11			**3,9**	

Примечание. Жирным шрифтом выделены решения, обеспечившие наилучшую точность.

На основании табл. 5 сделаны следующие выводы:

1. Предложенная методика учета влияния ВР при использовании усовершенствованного алгоритма определения коэффициента рефракции и полного набора измерительных уровней обеспечивает точность геометрического нивелирования III класса для всего представленного спектра ПП.
2. На всех визирных линиях точность повышается при увеличении количества измерительных уровней, взятых в обработку, что объясняется увеличением числа избыточных измерений.
3. Во всех случаях СКП превышений, исправленных с использованием усовершенствованного алгоритма определения коэффициента рефракции по градиентным геодезическим измерениям, выше, чем при использовании поправки за стандартный коэффициент рефракции. На двух линиях из трех СКП исправленных превышений уменьшилась вдвое.

4 Обсуждение

Результаты аналитических и полевых исследований, представленных в данной работе и в публикациях [19, 20], позволили сформировать методику учета влияния вертикальной рефракции по градиентным геодезическим измерениям при одностороннем тригонометрическом нивелировании. Требования к реализации методики приведены в табл. 6.

Таблица 6
Требования к реализации методики учета влияния вертикальной рефракции по градиентным геодезическим измерениям при одностороннем тригонометрическом нивелировании

Table 6
Requirements for implementing a method for accounting of vertical refraction effect based on gradient geodetic measurements in direct trigonometric levelling

Параметр	Класс точности нивелирования	
	III	IV
Рекомендуемое предельное расстояние до визирной цели (не более), м	500	1000
Точность измерения вертикального угла одним приемом (не ниже), ″	1	1
Количество полных приемов (не менее)	8	4
Рекомендуемое превышение между соседними визирными целями, м	0,25–0,5	0,25–0,5
Рекомендуемое количество уровней (не менее)	9	5
Точность измерения разности высот между измерительными уровнями, мм	1	1

Согласно результатам полевых экспериментов, без учета влияния ВР на линиях длиной несколько сотен метров получить точность геометрического нивелирования IV класса невозможно. Использование стандартного коэффициента рефракции [20] не обеспечивает стабильного повышения точности определения превышений до уровня IV класса.

Основная цель, которая преследовалась при разработке представленной методики и ее компонентов, заключалась в соблюдении баланса между затратами на реализацию учета влияния ВР и обеспечиваемым повышением точности. Подход к учету влияния ВР, базирующийся на использовании для определения коэффициента рефракции геодезических измерений на нескольких (не менее пяти) дополнительных уровнях, имеет ряд преимуществ:

- позволяет учесть фактическое состояние атмосферы на момент измерений;
- обеспечивает определение результирующих для трассы значений параметров атмосферы;
- реализуется с использованием только стандартного геодезического оборудования.

Дополнительные затраты на реализацию методики включают:

- закрепление на вехе дополнительных визирных целей;
- увеличение времени измерений (измерение вертикальных углов на одиннадцати уровнях по предложенной авторами процедуре угловых измерений на нескольких уровнях занимает около 30 мин.).

При этом перечисленные затраты минимальны в сравнении с затратами на производство геометрического нивелирования, особенно при наличии препятствий между конечными точками дистанции (водоем, пересеченная местность и т. п.).

5 Выводы

Разработанная методика учета влияния ВР по градиентным геодезическим измерениям при одностороннем тригонометрическом нивелировании (включающая алгоритм определения коэффициента рефракции по градиентным геодезическим измерениям; методические приемы производства градиентных геодезических измерений; процедуру производства угловых измерений на нескольких уровнях; программу полевых геодезических наблюдений при реализации геодезического способа определения параметров «геодезической» модели атмосферы) обеспечивает получение превышений методом тригонометрического нивелирования с точностью геометрического нивелирования III и IV классов для разных типов ПП и на разной высоте визирного луча и позволяет свести к минимуму затраты на определение параметров, характеризующих состояние атмосферы на момент измерений.

благодарности

Авторы выражают признательность заведующему кафедрой геодезии МИИГАиК В.В. Ознамцу, начальнику Чеховского геополигона МИИГАиК А.А. Ляшковскому, преподавателям кафедры геодезии МИИГАиК И.А. Клыпину и А.А. Захаровой, а также студенту МИИГАиК И.П. Хлебопашеву за помощь в организации эксперимента и проведении полевых измерений.

библиография

1. Куштин В.И., Щербак П.Н., Пимшина Т.М. и др. Учет влияния атмосферы на результаты высокоточных геодезических, астрономических и фотограмметрических измерений // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2023. Т. 91, № 3. С. 119–124. DOI:10.46973/0201-727X_2023_3_119.
2. Брынь М.Я., Лобанова Ю.В., Афонин Д.А. Об определении и учете коэффициента рефракции на строительной площадке // Вестник СГУГиТ. 2022. Т. 27, № 1. С. 6–14. DOI:10.33764/2411-1759-2022-27-1-6-14.
3. Дементьев Д.В. Определение вертикальной рефракции в приземном слое атмосферы // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56, № 4. С. 482–488. DOI:10.31857/S0002351520020029.
4. Дементьев Д.В. Исследования возможности определения вертикальной рефракции турбулентным методом // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 1. С. 41–44. DOI:10.15372/AOO20200105.
5. Мозжухин О.А. К анализу путей развития проблемы учета рефракции в нивелировании // Геодезия и картография. 2016. Т. 77, № 11. С. 16–19. DOI:10.22389/0016-7126-2016-917-11-16-19.
6. Мозжухин О.А. Рефракция в двустороннем тригонометрическом нивелировании. Определение поправок // Геодезия и картография. 2018. Т. 79, № 4. С. 8–13. DOI:10.22389/0016-7126-2018-934-4-8-13.
7. Гордеевцев А.В. Исследование способа учета рефракции в электронной тахеометрии // Геодезия и картография. 2007. № 4. С. 23–25.
8. Baselga S., García-Asenjo L., Garrigues P. Practical Formulas for the Refraction Coefficient // Journal of Surveying Engineering. 2014. Vol. 140. Iss. 2. P. 06014001. DOI:10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000124.
9. Ceylan A., Baykal O. Precise Height Determination Using Leap-Frog Trigonometric Leveling // Journal of Surveying Engineering. 2006. Vol. 132. Iss. 3. P. 118–123. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9453(2006)132:3(118).
10. Han M., Liu M.H. Research on the Total Station Trigonometric Leveling Using Midway Method Replaces Three/Four Grade Leveling // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 971–973. P. 1144–1147. DOI:10.4028/www.scientific.net/amr.971-973.1144.
11. Кошелев В.А., Карлин К.С., Чахлова А.П. Особенности развития геодезической разбивочной основы в условиях горной местности // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Международный научный конгресс: Международная научная конференция «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сборник материалов: в 3 т. Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 3. С. 214–219.
12. Кошелев В.А., Карлин К.С., Чахлова А.П. Инженерно-геодезическое сопровождение строительства канатных дорог // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Международный научный конгресс: Международная научная конференция «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сборник материалов: в 2 т. Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. С. 111–116.
13. Михалев А.В. Оценка возможности использования тригонометрического нивелирования для производства высокоточных измерений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2013. Т. 12, № 8. С. 136–144.
14. Кудабаев М.Д., Ногойбаева К.Б., Райымбек Кызы Г. и др. Исследование возможностей высокоточного тригонометрического нивелирования из середины взамен технологии геометрического нивелирования для решения специальных задач в условиях Кыргызстана // Наука и инновационные технологии. 2018. № 3 (8). С. 271–277.
15. Никонов А.В. Исследование точности тригонометрического нивелирования способом из середины при визировании над разными подстилающими поверхностями // Вестник СГГА. 2013. № 3 (23). С. 28–33.

16. Никонов А.В. Технологические схемы при проложении ходов тригонометрического нивелирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Международный научный конгресс: Международная научная конференция «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сборник материалов: в 2 т. Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. С. 77–83.
17. Никонов А.В. Исследование влияния вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования короткими лучами способом из середины // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2014. № 1. С. 28–34.
18. Shen Y., Huang T., Guo X., et al. Inversion Method of Atmospheric Refraction Coefficient based on Trigonometric Leveling Network // Journal of Surveying Engineering. 2016. Vol. 143. Iss. 1. P. 06016002. DOI:10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000199.
19. Валов Г.Е., Вшивкова О.В. Алгоритм определения коэффициента рефракции по градиентным геодезическим измерениям при одностороннем тригонометрическом нивелировании // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2024. Т. 9, № 4 (38). С. 14–22. DOI:10.25744/genb.2024.28.99.002.
20. Валов Г.Е., Вшивкова О.В. Полевая апробация алгоритма определения коэффициента рефракции по градиентным геодезическим измерениям при одностороннем тригонометрическом нивелировании // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 6. С. 8–24. DOI:10.30533/GiA-2025-057.

авторы

Валов Георгий Евгеньевич
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия;
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра высшей геодезии, геодезический факультет
0009-0006-3431-1917

Вшивкова Ольга Владимировна
ovvshivkova@miigaik.ru
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра высшей геодезии, геодезический факультет
д-р техн. наук, доцент
0000-0002-0315-7201

Поступила 21.11.2025. Принята к публикации 23.06.2026. Опубликована 30.06.2026.

UDC 528.024.4
DOI:10.30533/GiA-2026-023

CC BY

The Method of Accounting for the Influence of Vertical Refraction by Gradient Geodetic Measurements with Direct Trigonometric Levelling

Georgy E. Valov[1,2] ✉, **Olga V. Vshivkova**[1]

[1] Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
[2] Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
✉ georgevalov@mail.ru

citation Valov GE, Vshivkova OV. The Method of Accounting for the Influence of Vertical Refraction by Gradient Geodetic Measurements with Direct Trigonometric Levelling. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying.* 2026;70(3): 8–22. DOI:10.30533/GiA-2026-023.

keywords direct trigonometric levelling, vertical refraction, refraction coefficient, gradient geodetic measurements

abstract The paper presents a new method for the estimation of the vertical refraction effect in direct trigonometric levelling based on the gradient geodetic measurements. The authors developed an algorithm for the determining the refraction coefficient, a set of methodical principles of the gradient geodetic measurements production, a rational procedure for the execution of angular measurements at several levels, and a field work program. These components are part of the developed technique. The algorithm for the determining the refraction coefficient is based on the solving a system of nonlinear equations which describes the change in the refraction angle with height using the Monte Carlo method. The authors improved the early-developed algorithm to increase the accuracy of the vertical refraction accounting. A field experiment is described that made it possible to evaluate the efficiency of the improved algorithm for the refraction coefficient determining, to draw a conclusion about the working capacity of the proposed approach for the accounting the vertical refraction influence for various types of the underlying surface and in a wide range of the sight line heights, and to formulate requirements ensuring the determination of height differences with accuracy of classes III and IV of geometric levelling with the proposed technique realisation. The developed method of the estimation of the vertical refraction effect in direct trigonometric levelling based on the gradient geodetic measurements minimizes the cost of increase of height measurement accuracy and is implemented using only standard geodetic equipment.

acknowledgements The authors express their gratitude to V.V. Oznamts, Head of the Department of Geodesy of MIIGAiK; A.A. Lyashkovsky, Head of the Chekhov Geopolygon of MIIGAiK; I.A. Klypin and A.A. Zakharova, teachers of the Department of Geodesy of MIIGAiK, as well as I.P. Khlebopashev, student of MIIGAiK, for their help in the experiment organisation and the field measurement execution.

references

1. Kushtin VI, Shcherbak PN, Pimshina TM, et al. Uchet vliyaniya atmosfery na rezul'taty vysokotochnykh geodezicheskikh, astronomicheskikh i fotogrammetricheskikh izmerenii [Consideration of the Influence of the Atmosphere on the Results of High-Precision Geodetic, Astronomical and Photogrammetric Measurements]. ***Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya.*** 2023;91(3): 119–124. (In Russian). DOI:10.46973/0201-727X_2023_3_119.
2. Bryn' MYa, Lobanova YuV, Afonin DA. Ob opredelenii i uchete koehffitsienta refraktsii na stroitel'noi ploshchadke [Determining and Considering a Refractive Index on Construction Site]. ***Vestnik SSGA.*** 2022;27(1): 6–14. DOI:10.33764/2411-1759-2022-27-1-6-14.
3. Dement'ev DV. Opredelenie vertikal'noi refraktsii v prizemnom sloe atmosfery [Determination of Vertical Refraction in the Atmospheric Boundary Layer]. ***Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.*** 2020;56(4): 482–488. (In Russian). DOI:10.31857/S0002351520020029.
4. Dement'ev DV. Issledovaniya vozmozhnosti opredeleniya vertikal'noj refrakcii turbulentnym metodom [Studies of the Possibility of Determining Vertical Refraction by the Turbulent Method]. ***Atmospheric and Oceanic Optics.*** 2020;33(1): 41–44. (In Russian). DOI:10.15372/AOO20200105.
5. Mozzhukhin OA. K analizu putei razvitiya problemy ucheta refraktsii v nivelirovanii [On Analysis of the Ways of Development Issues on Accounting of Refraction in Leveling]. ***Geodesy and Cartography.*** 2016;77(11): 16–19. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2016-917-11-16-19.
6. Mozzhukhin OA. Refraktsiya v dvustoronnem trigonometricheskom nivelirovanii. Opredelenie popravok [Refraction in Bilateral Trigonometric Leveling. Definition of Corrections]. ***Geodesy and Cartography.*** 2018;79(4): 8–13. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2018-934-4-8-13.
7. Gordeevtsev AV. Issledovanie sposoba ucheta refraktsii v ehlektronnoi takheometrii [The Research of the Refraction Control Method in Electronic Tachymetry]. ***Geodesy and Cartography.*** 2007;4: 23–25. (In Russian)
8. Baselga S, García-Asenjo L, Garrigues P. Practical Formulas for the Refraction Coefficient. ***Journal of Surveying Engineering.*** 2014;140(2): 06014001. DOI:10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000124.
9. Ceylan A, Baykal O. Precise Height Determination Using Leap-Frog Trigonometric Leveling. ***Journal of Surveying Engineering.*** 2006;132(3): 118–123. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9453(2006)132:3(118).
10. Han M, Liu MH. Research on the Total Station Trigonometric Leveling Using Midway Method Replaces Three/Four Grade Leveling. ***Advanced Materials Research.*** 2014;971–973: 1144–1147. DOI:10.4028/www.scientific.net/amr.971-973.1144.
11. Koshelev VA, Karlin KS, Chakhlova AP. Osobennosti razvitiya geodezicheskoi razbivochnoi osnovy v usloviyakh gornoi mestnosti [Features of Development of the Building Network in the Conditions of Mountain District]. ***Interexpo GEO-Siberia-2013. IX International Scientific Congress: Proceedings of the International Scientific Conference "Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Surveying".*** In 3 vols. Vol. 3. Novosibirsk: SSGA; 2013: 214–219. (In Russian).
12. Koshelev VA, Karlin KS, Chakhlova AP. Inzhenerno-geodezicheskoe soprovozhdenie stroitel'stva kanatnykh dorog [Engineering-Geodetic Support of Construction Ropeways]. ***Interexpo GEO-Siberia-2014. X International Scientific Congress: Proceedings of the International Scientific Conference "Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Surveying".*** In 2 vols. Vol. 1. Novosibirsk: SSGA; 2014: 111–116. (In Russian).
13. Mikhalev AV. Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya trigonometricheskogo nivelirovaniya dlya proizvodstva vysokotochnykh izmerenii [Assessment of the Trigonometric Leveling Use for High-Precision Measurements]. ***Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering.*** 2013;12(8): 136–144. (In Russian).
14. Kudabaev MD, Nogoibaeva KB, Raiymbek Kyzy G, et al. Issledovanie vozmozhnostei vysokotochnogo trigonometricheskogo nivelirovaniya iz serediny vzamen tekhnologii geometricheskogo nivelirovaniya dlya resheniya spetsial'nykh zadach v usloviyakh Kyrgyzstana [The Study of Possibilities of High-Precision Trigonometric Leveling From the Middle Instead of the Technology of Geometric Leveling for Special Tasks

in the Conditions of Kyrgyzstan]. *Nauka i Innovatsionnye Tekhnologii.* 2018;8(3): 271–277. (In Russian).
15. Nikonov AV. Issledovanie tochnosti trigonometricheskogo nivelirovaniya sposobom iz serediny pri vizirovanii nad raznymi podstilayushchimi poverkhnostyami [Study of Accuracy in Trigonometric Leveling by Method "From the Middle" when Sighting over Different Underlying Surfaces]. *Vestnik SSGA.* 2013;23(3): 28–33. (In Russian).
16. Nikonov AV. Tekhnologicheskie skhemy pri prolozhenii khodov trigonometricheskogo nivelirovaniya [Technological Techniques of Trigonometric Height Traversing]. *Interexpo GEO-Siberia-2014. X International Scientific Congress: Proceedings of the International Scientific Conference "Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Surveying".* In 2 vols. Vol. 1. Novosibirsk: SSGA; 2014: 77–83. (In Russian).
17. Nikonov AV. Issledovanie vliyaniya vertikal'noi refraktsii na rezul'taty trigonometricheskogo nivelirovaniya korotkimi luchami sposobom iz serediny [Analysis of Vertical Refraction Influence on the Results of Leap-Frog Trigonometric Leveling with Short Length of Sight]. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying.* 2014;1: 28–34. (In Russian).
18. Shen Y, Huang T, Guo X, et al. Inversion Method of Atmospheric Refraction Coefficient Based on Trigonometric Leveling Network. *Journal of Surveying Engineering.* 2016;143(1): 06016002. DOI:10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000199.
19. Valov GE, Vshivkova OV. Algoritm opredeleniya koehffitsienta refraktsii po gradientnym geodezicheskim izmereniyam pri odnostoronnem trigonometricheskom nivelirovanii [Algorithm for Refraction Coefficient Determining from Gradient Geodetic Measurements for Trigonometric Leveling]. *Grozny Natural Science Bulletin.* 2024;38(4): 14–22. (In Russian). DOI:10.25744/genb.2024.28.99.002.
20. Valov GE, Vshivkova OV. Polevaya aprobaciya algoritma opredeleniya koehfficienta refrakcii po gradientnym geodezicheskim izmereniyam pri odnostoronnem trigonometricheskom nivelirovanii [Testing of Algorithm for Refraction Coefficient Determining from Gradient Geodetic Measurements for Unilateral Trigonometric Levelling]. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying.* 2025;69(6): 8–24. (In Russian). DOI:10.30533/GiA-2025-057.

authors

Georgy E. Valov
Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Higher Geodesy, Faculty of Geodesy
0009-0006-3431-1917

Olga V. Vshivkova
ovvshivkova@miigaik.ru
Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Higher Geodesy, Faculty of Geodesy
Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor
0000-0002-0315-7201

Submitted: November 21, 2025. Accepted: June 23, 2026. Published: June 30, 2026.

УДК 528.1
DOI:10.30533/GiA-2026-024

CC BY

Разработка методики и технологии автоматизированного периодического уравнивания сети постоянно действующих спутниковых геодезических станций

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

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

цитирование Куприянов А.О., Коробова А.С., Морозов Д.А., Замогильный Д. Разработка методики и технологии автоматизированного периодического уравнивания сети постоянно действующих спутниковых геодезических станций // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 3. С. 23–41. DOI:10.30533/GiA-2026-024.

ключевые слова уравнивание спутниковых геодезических сетей, периодическое уравнивание, технология автоматизации уравнивания, обработка наблюдений глобальной навигационной спутниковой системы, сеть дифференциальных геодезических станций, скорость движения станций

аннотация

Для определения скоростей движения пунктов и мониторинга целостности спутниковой геодезической сети необходимо периодически выполнять ее уравнивание. Данное исследование направлено на разработку методики и технологии автоматизированного периодического уравнивания сети дифференциальных геодезических станций (СДГС). Предлагаемые методика и технология основываются на использовании программного обеспечения (ПО) Bernese GNSS Software, инструмента Bernese Processing Engine и специально разработанного ПО на языке программирования Python. Данная технология позволяет производить автоматизированное уравнивание спутниковых сетей со скачиванием всех необходимых данных и последующей публикацией файлов результатов в формате SINEX на FTP-сервер. С ее помощью произведена апробация методики периодического уравнивания фрагмента сети Международной ГНСС-службы из 12 пунктов на период, составляющий 365 суток (с 1 января по 31 декабря 2023 года). Вычислены скорости пунктов совместно с их средними квадратическими погрешностями в топоцентрической горизонтной системе координат (ENU), и произведен анализ смещений станций сети по полученным уравненным координатам относительно первой эпохи. Методика может найти применение в геодинамических исследованиях, контроле целостности и выявлении смещений пунктов СДГС, вычислении скорости движений пунктов СДГС.

1 Введение

В настоящее время во многих регионах мира созданы постоянно действующие сети наблюдения глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) для различных целей: создания высокоточных геодезических сетей, мониторинга геодинамических процессов и установления системы отсчета. Данные сети классифицируются по размеру[1] (глобальные, научно-исследовательские, федеральные, региональные и частные). Глобальные сети создаются в первую очередь для научных исследований, требующих международного сотрудничества, тогда как сети для прикладных задач находятся на территории одного государства. Глобальные сети, такие как сети Международной ГНСС-службы (*англ.* International GNSS Service, IGS[2]), поддерживают международную систему отсчета ITRF (*англ.* International Terrestrial Reference Frame), а сеть некоммерческого университетского консорциума UNAVCO (*англ.* University NAVSTAR Consortium) используется для геодинамических исследований, включая изучение деформаций земной коры, вулканической активности и изменения уровня моря[3,4]. Федеральные сети, в частности фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС) [1, 2], обеспечивают государственную систему отсчета. Региональные сети, такие как федеральная сеть геодезических станций (ФСГС), и частные сети (HIVE, PrinNet, «ГЕОСПАЙДЕР», SmartNet, UGTNET, RTKNet, Topnet Live и др.[5,6] [3, 4]) функционируют в качестве сетей дифференциальных геодезических станций (СДГС).

Ежедневный объем наблюдений ГНСС, собираемый такими сетями, требует высокоавтоматизированной обработки для осуществления контроля целостности сети, выявления смещения пунктов СДГС и получения актуальных координат станций на текущую эпоху в виде файла SINEX (*англ.* Solution INdependent EXchange Format) [5–7]. Для реализации автоматизированного ежесуточного уравнивания спутниковой геодезической сети (СГС) за длительные периоды необходима унифицированная технология, обеспечивающая полную цикличность процессов: от автоматизированного получения исходных данных до выгрузки полученных результатов, а также учет дополнительных корректирующих файлов для повышения точности. Существующие решения обычно создаются индивидуально для конкретных сетей, задач или центров обработки данных ГНСС. Такие системы часто включают локально разработанные программные компоненты, которые недоступны для широкого использования или приобретения. Поскольку без владения такой технологией затруднительно проводить исследования в области геодинамики, установления системы отсчета, контроля целостности сети, требуется разработать собственное программное обеспечение (ПО).

Научная актуальность настоящей работы заключается в разработке обобщенной методики и программно-технологического решения, позволяющего интегрировать существующее ПО (Bernese GNSS Software[7] [далее Bernese], GAMIT/GLOBK, RTKLib и др.) в полностью автоматизированный цикл периодического уравнивания СДГС. Такой подход обеспечивает не только техническую

1 ГОСТ Р 55024-2012. Сети геодезические. Классификация. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2014. 7 с.

2 International GNSS Service. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://igs.org (дата обращения: 28.04.2025).

3 GPS and Earthquakes. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.earthscope.org/what-is/gps/gps-and-earthquakes/ (дата обращения: 28.04.2025).

4 Hazards & Applications. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.earthscope.org/what-is/hazards-applications/ (дата обращения: 28.04.2025).

5 Юламанова И.И. Создание сети постоянно действующих спутниковых станций // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2016. № 3. С. 5–7.

6 Шаймарданова Р.Р. Создание сети постоянно действующих спутниковых референцных станций // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2017. № 5. С. 19–21.

7 Bernese GNSS Software. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.bernese.unibe.ch (дата обращения: 28.04.2025).

автоматизацию, но и стандартизацию процесса обработки, что повышает надежность, воспроизводимость и оперативность результатов.

Целью данной научно-исследовательской работы является разработка такой методики и технологии автоматизированного периодического уравнивания сети постоянно действующих спутниковых геодезических станций, которая обеспечивает:

- снижение трудозатрат и исключение человеческого фактора при обработке больших массивов ГНСС-данных;
- повышение оперативности предоставления координат и скоростей станций на актуальную эпоху;
- воспроизводимость и стандартизацию процесса уравнивания для целей геодинамического мониторинга, контроля целостности СДГС и поддержания систем отсчета.

В разработке такой технологии ключевым этапом является выбор основного программного компонента, который будет непосредственно выполнять обработку ГНСС-наблюдений. В настоящее время для проведения автоматизированной обработки данных ГНСС применяются такие программные средства, как Bernese, GAMIT/GLOBK [8–13]. Они поддерживают неинтерактивный режим работы (скриптовую автоматизацию), что позволяет выполнять ежесуточную обработку данных за длительные периоды без участия оператора. Эти программы отличаются гибкой архитектурой, предоставляют доступ к исходному коду, обеспечивают высокую точность обработки наблюдений ГНСС за счет использования дополнительных файлов корректирующих моделей (ионосферных и тропосферных задержек, океанических приливов и приливов твердой Земли и т. д.), необходимых для научных задач.

Для реализации разрабатываемой технологии в качестве основного компонента выбрано программное обеспечение Bernese, т. к. его модуль BPE (*англ.* Bernese Processing Engine) обеспечивает большую гибкость настройки автоматизированных рабочих процессов обработки наблюдений ГНСС.

Разработана методика по применению модуля BPE ПО Bernese для выполнения регулярного автоматизированного уравнивания спутниковых геодезических сетей. Для ее практической реализации создана специальная технология — программа на языке Python, обеспечивающая автоматическое скачивание необходимых данных, выполнение обработки и выгрузку результатов на FTP-сервер. Технология позволяет производить уравнивание для большого количества суток подряд в заданном интервале или уравнивать каждые новые сутки по факту появления необходимых для этого данных.

2 Материалы и методы

Разработанная технология использует для обработки наблюдений ГНСС модуль BPE, который позволяет осуществлять обработку данных ГНСС в соответствии с выбранными / составленными скриптами. Скрипты BPE представляют собой программные модули на Perl, предназначенные для автоматизации и управления процессами обработки данных ГНСС. BPE имеет возможность запускаться в двух режимах: интерактивном и неинтерактивном. В неинтерактивном режиме модуль BPE запускается в виде консольного приложения. BPE также способен выполнять более одной задачи одновременно на различных (локальных, удаленных) центральных процессорах (*англ.* Central Processing Unit) и даже может распределять одну задачу между ними. Перед началом работы с BPE необходимо разместить все используемые программой файлы для обработки по соответствующим директориям и обновить ряд общих файлов, включающий в себя файлы спутниковой информации, определения геодезических систем отсчета, файлы с константами, используемыми Bernese.

Для уравнивания спутниковой геодезической сети в Bernese требуется набор дополнительных файлов, обеспечивающий получение высокоточного

результата. Файлы для обработки разделяются по периодичности обновления: одни требуют регулярной актуализации с FTP-сервера разработчиков Bernese, другие создаются единожды для конкретной сети. Однако есть файлы, которые необходимо скачивать ежедневно — перед обработкой данных на каждые сутки. Поскольку целью работы является создание методики и технологии автоматизированного периодического уравнивания сети постоянно действующих спутниковых геодезических станций, то даже на уровне сбора исходной измерительной информации требуется автоматизировать скачивание необходимых файлов.

Файлы наблюдений в форматах RINEX V2 и RINEX V3 скачиваются на каждые обрабатываемые сутки с сервера обрабатываемой сети или локального диска с предварительно загруженными туда данными. Эти файлы могут быть сжаты в архив и дополнительно сжаты путем конвертации в формат Compact RINEX по схеме Hatanaka. Разработанная технология предусматривает такие виды разархивирования и конвертации.

Дополнительные файлы ассистирующей информации скачиваются с FTP- или HTTP-сервера одного из аналитических центров, занимающихся их формированием: IGS, Центра определения орбит в Европе (*англ.* Center for Orbit Determination in Europe, CODE), Информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения, Японского агентства аэрокосмических исследований (*англ.* Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA), Квазизенитной спутниковой системы (*англ.* Quasi-Zenith Satellite System Services, QSS), Центра орбитальных и наземных данных (*англ.* Scripps Orbit and Permanent Array Center, SOPAC), Национального географического института Франции (*франц.* Institut Geographique National, IGN). Такими данными являются файлы: глобальной ионосферной карты; межканальных задержек; точных эфемерид и поправок часов; параметров вращения Земли.

Для работы BPE необходим ряд файлов, отвечающих за систему инфраструктуры ГНСС. Они должны обновляться по мере выхода новых версий, поставляемых разработчиками Bernese на FTP-сервере[8], и располагаться во внутренней директории GEN. Это файлы:

- I20.ATX (модель калибровки антенн);
- SAT_YYYY.CRX (возникающие проблемы спутников — изменение траектории, неправильные интервалы наблюдений);
- SATELLITT.I20 (спутниковая информация);
- PCV_COD.I20 (информация о фазовом центре спутниковой антенны и антенны приемника, изменении эксцентриситетов);
- CONST (константы, используемые в программе);
- DATUM (определение геодезических систем отсчета);
- GPSUTC (високосные секунды);
- RECEIVER (характеристики приемника);
- IAU2000R06.NUT (модель нутации);
- IERS2010XY.SUB (модель полюса);
- EGM2008_SMALL (коэффициенты геопотенциала Земли);
- OT_FES2004.TID (коэффициенты модели океанических приливов);
- TIDE2000.TPO (приливы твердой Земли);
- s1_s2_def_ce.dat (сетка с поправками на атмосферную приливную нагрузку).

Для работы BPE также необходимо сформировать (один раз на всю обрабатываемую сеть) следующие файлы в формате Bernese[9] с информацией об обрабатываемой сети:

- {V_REFINF}_R.CRD (априорные координаты с указанием системы отсчета и эпохи) — на основе априорной информации о координатах станций, полученной из внешних источников;

8 Bernese GNSS Software. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://ftp.aiub.unibe.ch/BSWUSER52/ (дата обращения: 28.04.2025).

9 Bernese GNSS Software Version 5.2. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.bernese.unibe.ch/docs/DOCU52.pdf (дата обращения: 28.04.2025).

- {V_REFINF}_R.VEL (скорости априорных координат станций с указанием системы отсчета) — на основе полученных из внешних источников данных об априорных скоростях движения станций;
- {V_CRDINF}.CRD (координаты с указанием системы отсчета и эпохи) — на основе файлов наблюдений;
- {V_CRDINF}.VEL (скорости с указанием системы отсчета) — если в априорном файле нет скоростей определяемых станций;
- {V_CRDINF}.ABB (аббревиатуры) — на основе списка станций (создается пользователем или автоматически);
- {V_CRDINF}.STA (информация о станциях) — на основе метаданных станций;
- {V_CRDINF}.CLU (сокращения заголовков RINEX и кластеры: разбивка обработки станций на группы, нумерация 0–99) — для организации обработки (создается пользователем или автоматически);
- {V_ATLINF}.ATL (поправки за атмосферу) — на основе модели атмосферных поправок (может быть создан автоматически или импортирован из внешних источников).

Все вышеуказанные файлы создаются через внутренние сервисы Bernese.

Посредством использования внешних сервисов необходимо создать следующие файлы:

- {V_BLQINF}.BLQ (океанические нагрузки) — с помощью сервиса Ocean Tide Loading[10,11] путем отправления запроса с наименованием станций и их приближенными геодезическими или прямоугольными координатами, которых нет в файле FES2004.BLQ с информацией по станциям сети IGS на FTP-сервере, поставляемом разработчиками Bernese;
- DE405.EPH (планетарные и лунные эфемериды) — посредством подпрограммы Bernese и командной строки из составляющих файлов с FTP-сервера планетарных и лунных эфемерид сайта Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института[12] (формируется на 20 лет и размещается в директории GEN, обеспечивает высокоточные данные о положении планет и Луны для расчета гравитационных возмущений, релятивистских поправок).

Для обработки нужно составить скрипт, получить и разместить в правильных местах следующие файлы: основные (ежедневные файлы наблюдений RINEX, конвертируемые в RINEX V2), дополнительные (ассистирующая информация из аналитических центров) и сервисные (регулярно обновляемые файлы инфраструктуры ГНСС и обрабатываемой сети — координаты, скорости, метаданные).

Разрабатываемая методика должна удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечивать полную автоматизацию всех этапов обработки без участия оператора;
- поддерживать обработку длительных временных рядов (поскольку в сети IGS существуют станции с непрерывными наблюдениями, охватывающими период до 30 лет, — это максимальная продолжительность непрерывных данных, доступная на сегодняшний день);
- гарантировать воспроизводимость результатов при повторном запуске;
- обеспечивать соответствие точности обработки требованиям геодинамических исследований, необходимых для надежного выявления малых, но физически значимых деформаций земной коры, таких как тектонические смещения, постсейсмические деформации или оседания, вызванные антропогенными факторами (согласно техническому отчету IGS[13],

10 Ocean Tide Loading. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://holt.oso.chalmers.se/loading/ (дата обращения: 28.04.2025).

11 Ocean Tide Loading Provider. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://teromovigo.com/product/ocean-tide-loading-provider/ (дата обращения: 28.04.2025).

12 Public FTP File Browser / Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ssd.jpl.nasa.gov/ftp/eph/planets/ascii/de405/ (дата обращения: 28.04.2025).

13 International GNSS Service Technical Report 2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://files.igs.org/pub/resource/technical_reports/2020_techreport.pdf (дата обращения: 03.06.2025).

для точного обнаружения таких эффектов на фоне шумов измерений и атмосферных возмущений необходимо, чтобы средняя квадратическая погрешность [СКП] координатного определения не превышала 10 мм в плане и 20 мм по высоте).

Эффективность технологии оценивалась по следующим критериям:

- времени обработки одного дня по сравнению с интерактивным режимом;
- степени соответствия вычисленных скоростей станций априорным данным ITRF2020[14];
- устойчивости к сбоям при загрузке данных и возможности автоматического восстановления обработки;
- полученной точности — СКП координат станций СДГС.

3 Результаты и обсуждение

3.1 Методика

Для реализации автоматизированного уравнивания спутниковых сетей была разработана методика, основанная на использовании модуля BPE Bernese (рис. 1). Первые три этапа методики являются подготовительными, а последующие пять — основными.

На предварительном этапе определяется состав станций обрабатываемой сети, фиксируется временной интервал, за который будут собираться данные. Устанавливаются также источники, из которых будут загружаться основные и дополнительные файлы для обработки.

На первом этапе требуется установить необходимые программные компоненты для корректной работы автоматизированного запуска BPE Bernese на операционной системе Microsoft Windows, компилятор Perl 5.10.0.6, который нужен для выполнения скриптов автоматизации, управления обработкой данных и интеграции вспомогательных модулей. В директории %C%\GPS\EXE следует разместить программу CRX2RNX.EXE для распаковки Compact RINEX по схеме Хатанака. Путь к данным программам необходимо прописать переменной окружения Microsoft Windows Path, представляющей собой набор каталогов, в которых расположены исполняемые файлы.

На втором этапе для файлов результатов в директории %S%\RNX2SNX (область SAVEDISK) надо создать папку с наименованием обрабатываемого года из четырех символов, в которой размещают папки ATM, OUT, SOL, STA. Это делается для того, чтобы после выполнения обработки программа могла сохранить полученные результаты.

На третьем этапе необходимо подготовить файл, который будет запускать BPE в режиме автоматизированного запуска. Для этого надо открыть Bernese, выбрать требуемую сессию (день обработки) и запустить модуль BPE. Далее BPE настраивают под необходимые параметры, выбирают исполняющий файл PCF — файл управления процессом, определяющий, какие сценарии должны запускаться и в каком порядке выполняться. Для периодического уравнивания подходит файл RNX2SNX.PCF, который производит стандартную обработку по двойным разностям региональных сетей для вычисления координат и параметров тропосферы всех включенных станций в заданной системе отсчета. После заполнения всех необходимых параметров вместо интерактивного запуска BPE параметры BPE надо сохранить в файле с именем по умолчанию RUNBPE.INP (INP — стандартный формат программы) в директории %U%/PAN. Данный файл позволяет произвести запуск модуля BPE в неинтерактивном режиме.

14 ITRF2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://itrf.ign.fr/en/solutions/ITRF2020 (дата обращения: 28.04.2025).

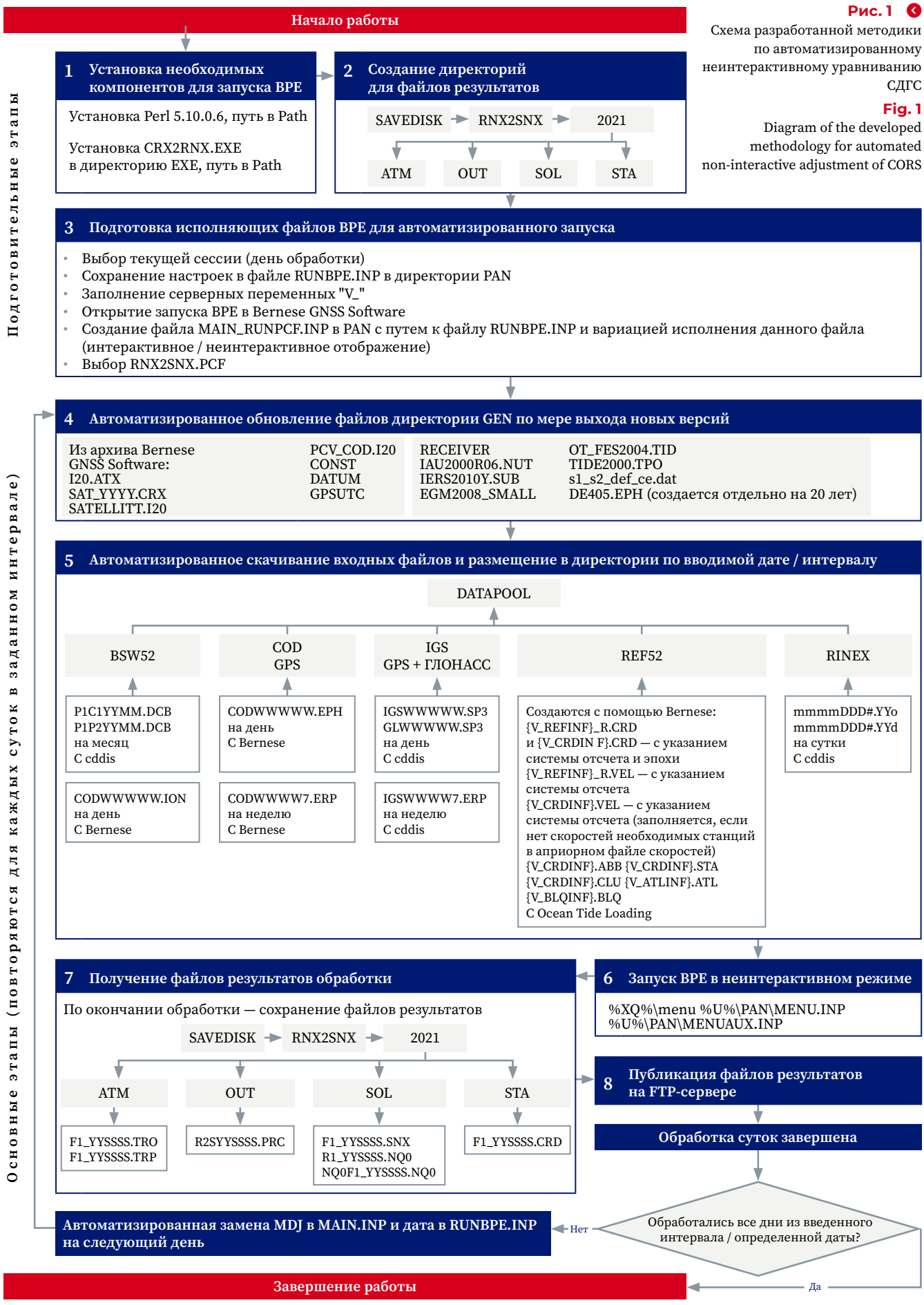


Рис. 1
Схема разработанной методики по автоматизированному неинтерактивному уравниванию СДГС

Fig. 1
Diagram of the developed methodology for automated non-interactive adjustment of CORS

Рис. 2
Схема программной реализации автоматизированного уравнивания

Fig. 2
Scheme of the software implementation for automated network adjustment

На четвертом этапе следует обновить файлы директории GEN по мере выхода новых версий, отвечающих за систему инфраструктуры ГНСС, поставляемые разработчиками Bernese на своем FTP-сервере.

На пятом этапе требуется скачать входные файлы (с ассистирующей информацией, наблюдений, в формате Bernese с информацией об обрабатываемой сети) и распределить их по соответствующим директориям.

Когда все необходимые файлы подготовлены, выполняют запуск BPE в неинтерактивном режиме с помощью раннее созданного файла RUNBPE.INP и производят неинтерактивное уравнивание спутниковой сети по скриптам. По завершении обработки результаты сохраняют в ранее созданных директориях области %S% (SAVEDISK). Полученные файлы результатов, а именно SINEX-файлы, публикуют на FTP-сервере.

После того как обработка на заданные сутки будет завершена, необходимо заменить модифицированную юлианскую дату (*англ.* Modified Julian Date, MDJ) на MDJ следующего обрабатываемого дня. Меняют также дату в файле с сохраненными, выбранными серверными переменными RUNBPE.INP. Затем переходят к обработке следующих суток.

3.2 Технология

Данная методика реализована в форме ПО autoBPE.exe, разработанного на языке программирования Python. ПО выполняет полный цикл обработки данных: принимает параметры из консоли, считывает список станций из stationlist.txt, автоматически скачивает и конвертирует RINEX-файлы, загружает дополнительные данные, запускает модуль Bernese BPE для уравнивания сети, сохраняет результаты в формате SINEX и выгружает их на FTP-сервер. При этом программа проверяет завершение обработки всех дней из заданного интервала, автоматически обновляя даты в файлах конфигурации (MAIN.INP, RUNBPE.INP) для последующих итераций. Схема работы программы autoBPE.exe приведена на рис. 2.

Работа программы autoBPE.exe начинается с ее запуска через командную строку с указанием параметров — даты или временного интервала обработки. На первом этапе программа считывает список станций из файла stationlist.txt, который определяет, для каких наименований станций необходимо загрузить данные.

Далее следует загрузка файлов RINEX. Если на серверах доступны только файлы формата RINEX V3, они автоматически конвертируются в стандартный RINEX V2 с помощью инструмента gfzrnx.exe. Для файлов, сжатых в формате Hatanaka (CRX), используется ПО CRX2RNX.exe, которое декомпрессирует их в обычный формат RINEX. Все загружаемые файлы переименовываются в соответствии с установленными правилами, что обеспечивает единообразие структуры данных.

Процесс скачивания файлов включает строгую фильтрацию: загружаются только те данные, которые соответствуют названиям станций из stationlist.txt и заданному временному периоду. Перед загрузкой программа проверяет директорию на наличие аналогичного файла, и, если такой уже существует, повторное скачивание пропускается. Распакованные архивы автоматически перемещаются в заранее определенные каталоги для дальнейшей обработки.

После подготовки данных программа запускает модуль BPE, который выполняет обработку на основе загруженных файлов. Результаты обработки сохраняются в директорию SAVEDISK в формате SINEX. Если заданный период включает несколько дней, autoBPE.exe обновляет параметры в файлах MAIN.INP и RUNBPE.INP (меняет дату на следующий день) и повторяет цикл до тех пор, пока все дни не будут обработаны.

Программа также постоянно отслеживает FTP-серверы на предмет появления новых файлов, необходимых для обработки. При обнаружении недостающих данных autoBPE.exe автоматически загружает, преобразует и распределяет их. Вся логика работы реализована в виде полностью автоматизированного

процесса, который охватывает этапы от сбора данных до выгрузки результатов, обеспечивая надежность и эффективность обработки.

3.3 Апробация

Для проверки разработанной технологии было решено провести опытную эксплуатацию. Основной целью является наблюдение за функционированием технологии при уравнивании длительных периодов, а также выявление и устранение возможных проблем. Для этого была сформирована локальная сеть путем выделения 12 пунктов IGS на период с 01.01.2023 по 31.12.2023 (365 суток) и выполнено ее уравнивание. Выбор сети IGS продиктован тем, что файлы ГНСС-наблюдений со станций расположены в общем доступе и в большинстве случаев имеются в наличии на каждый день на сервере информационной системы данных о динамике земной коры (*англ.* Crustal Dynamics Data Information System, CDDIS[15]) НАСА. Bernese разрабатывался как специализированный инструмент для высокоточной обработки ГНСС-наблюдений, включая данные сети IGS. Поэтому в отношении сети IGS уже сформированы все необходимые для обработки дополнительные файлы.

Выбранные станции близко расположены друг к другу (среднее расстояние между ближайшими станциями составляет 20 км), что позволяет сформировать из них локальную сеть для детального мониторинга геодинамических процессов. Кроме того, Калифорния представляет особый интерес для геодезических исследований из-за высокой сейсмической и тектонической активности, связанной с взаимодействием Тихоокеанской и Северо-Американской плит. Это делает данный регион подходящим для опытной эксплуатации разработанной технологии в условиях геодинамических процессов [14, 15]. Схема используемой СГС представлена на рис. 3.

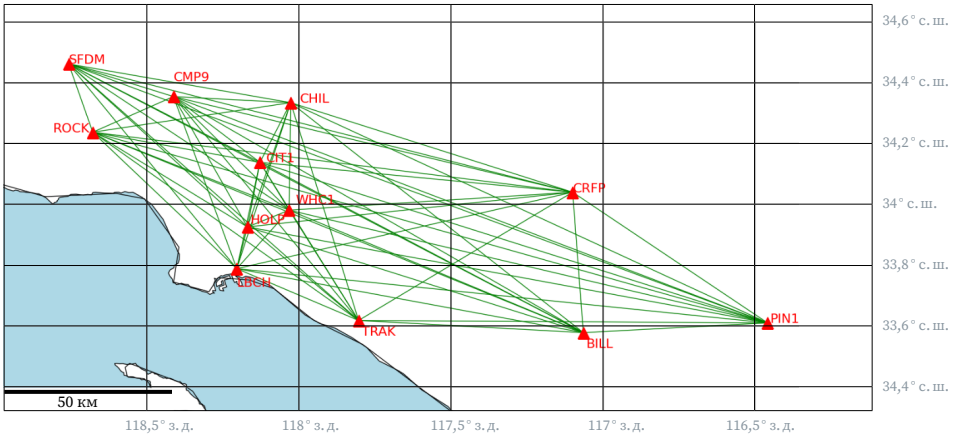


Рис. 3
Схема используемой СГС

Fig. 3
Scheme of the satellite geodetic network used

Обрабатывая 12 станций сети IGS, мы получаем 11 построенных базовых линий. Bernese обрабатывает независимые базовые линии ($n-1$, где n — количество обрабатываемых станций), формируя разности с наибольшим количеством общих измерений.

Уравнивание на весь заявленный период (365 суток) было успешно выполнено при помощи разработанной технологии. По результатам обработки на 365 суток были получены файлы нормальных уравнений NQ0, файл уравненных координат CRD и SINEX-файлы.

Автоматизированное уравнивание спутниковой геодезической сети на один день занимало около 15 минут. В то же время, если уравнивать вручную (включая самостоятельную загрузку всех необходимых файлов), временные затраты на данную процедуру возрастают в три раза. Автоматизированное уравнивание

15 CDDIS. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.earthdata.nasa.gov/centers/cddis-daac (дата обращения: 28.04.2025).

выбранных пунктов на период с 01.01.2023 по 31.12.2023 заняло около 6000 мин., или 5 дней беспрерывной работы разработанной программы на процессоре Intel Core i5-11400 с частотой оперативной памяти 3200 МГц. Стоит принять во внимание то, что иногда сервер BPE выходил из строя, что приводило к сбоям в обработке данных за определенный временной интервал. В таких ситуациях разработанная программа обеспечивала повторное выполнение уравнивания необработанных данных соответствующего дня.

Проверка возможности обработки длительных временных рядов (до 30 лет) была выполнена на примере станций WHC1, BILL и TRAK сети IGS, для которых доступны непрерывные RINEX-наблюдения с минимальными изменениями аппаратуры и стабильным положением антенн на протяжении всего периода. Обработка данных на весь доступный период времени подтвердила работоспособность разработанной методики и устойчивость результатов уравнивания.

Для проверки воспроизводимости результатов уравнивание одной и той же сети IGS из 12 станций за период с 01.01.2023 по 31.12.2023 было выполнено три раза подряд с полной перезагрузкой исходных данных и повторным проведением вычислений. Сравнение полученных координат и скоростей показало полное совпадение результатов, что подтверждает высокую степень воспроизводимости результатов при использовании разработанной методики и технологии.

3.4 Результаты апробации

В рамках опытной эксплуатации разработанной технологии выполнено автоматизированное периодическое уравнивание 12 станций сети IGS на 365 суток и получены SINEX-файлы с оцененными координатами данных станций на 365 суток. Составлены временные ряды приращений координат станций относительно первой эпохи, по которым вычислены плановые (m_{EN}) и высотные (m_U) СКП в горизонтной топоцентрической системе координат (E — восток, N — север, U — высота), приведенные в табл. 1.

Таблица 1
СКП в плане и по высоте

Table 1
RMS in plan and height

Станция	m_{EN}, мм	m_U, мм
BILL	7,435	2,104
CHIL	6,650	2,384
CIT1	10,203	3,321
CMP9	7,472	1,904
CRFP	9,687	2,183
HOLP	5,838	1,604
LBCH	6,000	1,589
PIN1	13,244	7,313
ROCK	9,621	9,758
SFDM	8,723	2,812
TRAK	6,360	1,777
WHC1	6,143	1,652

По имеющимся приращениям были оценены скорости движения и их СКП путем аппроксимации по методу наименьших квадратов, в частности по параметрическому методу. Для верификации полученных результатов использовались скорости станций и их СКП из кинематической модели положения станций ITRF, актуальных на 2023 год. Вычисленные и априорные скорости совместно с их СКП в горизонтной топоцентрической системе координат ENU приведены в табл. 2.

Таблица 2
Рассчитанные априорные скорости и СКП для рассматриваемых станций

Table 2
Estimated a priori velocities and RMS for the selected geodetic stations

Станция	Bernese, мм						ITRF2020, мм					
	V_E^{aBPE}	V_N^{aBPE}	V_U^{aBPE}	$m_{V_E^{aBPE}}$	$m_{V_N^{aBPE}}$	$m_{V_U^{aBPE}}$	V_E^{ITRF}	V_N^{ITRF}	V_U^{ITRF}	$m_{V_E^{ITRF}}$	$m_{V_N^{ITRF}}$	$m_{V_U^{ITRF}}$
BILL	−35,102	15,842	6,472	0,321	0,217	1,370	−35,583	14,849	−0,097	0,132	0,151	0,163
CHIL	−36,471	10,939	3,206	0,344	0,272	1,225	−34,743	12,844	1,688	3,085	3,450	3,750
CIT1	−35,189	14,881	7,881	0,446	0,419	1,880	−34,871	15,929	−0,669	3,156	3,711	3,918
CMP9	−33,446	14,210	−1,331	0,231	0,264	1,377	−36,252	14,761	−0,934	3,310	3,957	4,177
CRFP	−29,716	7,016	9,959	0,313	0,252	1,785	−28,617	8,687	1,120	0,325	0,372	0,404
HOLP	−39,053	15,915	13,386	0,208	0,210	1,074	−38,288	15,519	−4,511	0,273	0,313	0,335
LBCH	−36,204	14,545	−6,097	0,215	0,199	1,103	−39,366	18,684	0,545	0,096	0,104	0,111
PIN1	−25,539	9,314	12,765	1,175	0,659	2,439	−27,979	6,610	−0,930	3,305	3,928	4,293
ROCK	−38,328	20,469	10,561	1,659	0,694	1,772	−38,366	17,131	0,684	0,207	0,242	0,253
SFDM	−36,384	13,340	7,838	0,376	0,356	1,607	−36,753	13,990	2,367	3,112	3,400	3,780
TRAK	−38,387	16,660	−3,900	0,225	0,238	1,168	−37,916	18,786	−1,040	3,301	3,872	4,239
WHC1	−37,969	16,219	−3,730	0,229	0,201	1,129	−38,691	15,122	−2,082	0,226	0,260	0,278

Для оценки корректности полученных скоростей использовались разности между априорными и вычисленными скоростями. СКП такой разности, исходя из функции общего вида, выражают следующей формулой:

1

$$m_{dV_i} = \sqrt{\left(m_{V_i^{aBPE}}\right)^2 + \left(m_{V_i^{ITRF}}\right)^2},$$

где i — координата в горизонтной топоцентрической системе координат ENU.

Используя доверительный интервал для вероятности 99,73 %, можем рассчитать предельную допустимую погрешность разности как

2

$$F = \pm 3 \times m_{dV_E}.$$

Если полученная разность не превышает предельную погрешность, можно сделать вывод о том, что скорости и их СКП получены корректно. Результаты соответствующих вычислений приведены в табл. 3.

Таблица 3
Результаты сравнительного анализа рассчитанных и априорных скоростей

Table 3
Results of the comparative analysis of calculated velocities versus a priori velocities

Станция	Разность скоростей, мм			СКП разности, мм			Предельная погрешность, мм			$F - \lvert\Delta V\rvert$, мм		
	ΔV_E	ΔV_N	ΔV_U	m_{dV_E}	m_{dV_N}	m_{dV_U}	F_{dV_E}	F_{dV_N}	F_{dV_U}	ΔE	ΔN	ΔU
BILL	−0,481	−0,993	−6,569	0,347	0,264	1,380	1,041	0,793	4,139	0,561	−0,200	−2,429
CHIL	1,728	1,905	−1,519	3,104	3,460	3,945	9,311	10,381	11,836	7,584	8,476	10,317
CIT1	0,317	1,048	−8,549	3,187	3,734	4,346	9,561	11,203	13,037	9,244	10,155	4,487
CMP9	−2,806	0,551	0,397	3,318	3,966	4,398	9,955	11,898	13,194	7,149	11,348	12,797
CRFP	1,099	1,671	−8,839	0,451	0,449	1,830	1,353	1,347	5,491	0,254	−0,324	−3,349
HOLP	0,765	−0,396	−17,897	0,343	0,377	1,125	1,030	1,131	3,376	0,265	0,735	−14,521
LBCH	−3,162	4,140	6,641	0,235	0,225	1,108	0,706	0,674	3,325	−2,456	−3,466	−3,317
PIN1	−2,440	−2,704	−13,695	3,508	3,983	4,938	10,524	11,950	14,814	8,084	9,246	1,119
ROCK	−0,038	−3,339	−9,877	1,672	0,735	1,790	5,015	2,206	5,371	4,977	−1,133	−4,506
SFDM	−0,369	0,650	−5,471	3,135	3,418	4,108	9,404	10,255	12,323	9,035	9,605	6,851
TRAK	0,471	2,126	2,860	3,309	3,879	4,397	9,927	11,637	13,192	9,456	9,511	10,332
WHC1	−0,721	−1,097	1,648	0,321	0,329	1,163	0,964	0,986	3,488	0,243	−0,111	1,841

В большинстве случаев ΔV_E, ΔV_N, ΔV_U не выходят за пределы заданного доверительного интервала, что подтверждает высокую степень соответствия вычисленных скоростей станций априорным данным ITRF2020. Однако есть ряд исключений. Для ~40 % станций ΔV_U по высоте выходит за пределы доверительного интервала. Причиной этого может как небольшая продолжительность используемого интервала времени, так и различия в способе аппроксимации ряда приращения координат.

В ITRF (начиная с 2014 года) смещения станции аппроксимируются следующей функцией[16]:

3 $$X(t) = X(t_0) + \dot{X}(t - t_0) + \delta X_{PSD}(t) + \delta X_f(t),$$

где $X(t_0)$ — положение станции;
$\dot{X}(t - t_0)$ — скорость станции;
$\delta X_{PSD}(t)$ — поправка за постсейсмическую деформацию[16];
$\delta X_f(t)$ — поправка за сезонные вариации[16].

Модели постсейсмической деформации ни для одной из рассматриваемых станций нет, поэтому данный фактор не мог повлиять на результаты анализа. Моделирование сезонных вариаций не выполнялось, т. к. период в один год слишком мал для такого моделирования, следовательно, линейная аппроксимация рассчитывалась по формуле

4 $$X(t) = X(t_0) + \dot{X}(t - t_0).$$

Проверим, насколько учет периодических движений станции позволяет уменьшить полученные ΔV_E, ΔV_N, ΔV_U на примере станции PIN1. Вычислим для каждых суток рассматриваемого интервала поправку в высоту за периодические движения станции, используя годовые и полугодовые амплитуды из ITRF2020 и формулу[16]

5 $$\delta X_f(t) = \sum_{i=1}^{2} \begin{pmatrix} a_x^i \\ a_y^i \\ a_z^i \end{pmatrix} \cos(2i\pi t) + \begin{pmatrix} b_x^i \\ b_y^i \\ b_z^i \end{pmatrix} \sin(2i\pi t),$$

где t — десятичное значение года;
a — коэффициент сезонных поправок косинуса для годовых и полугодовых амплитуд в системе ENU;
b — коэффициент сезонных поправок синуса для годовых и полугодовых амплитуд в системе ENU;
i — параметр, принимающий значение 1 при расчете годовых амплитуд и 2 при расчете полугодовых амплитуд.

Используя полученные поправки, вычислим исправленные приращения координат

6 $$X(t) = X(t_0) + \dot{X}(t - t_0) + \delta X_f(t),$$

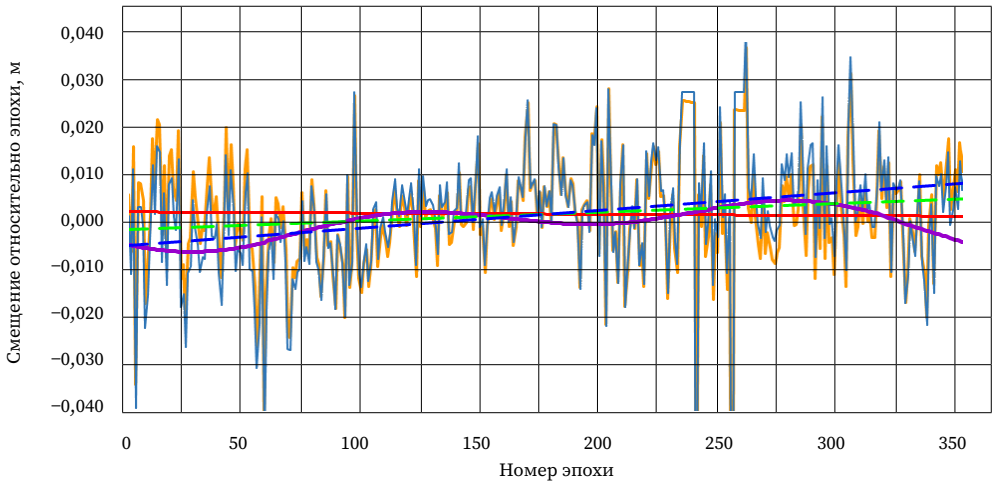
а по ним — скорость станции PIN1, используя линейную аппроксимацию. На графике, приведенном на рис. 4, отображено смещение станции PIN1 относительно первой эпохи по оси U без поправки за сезонные вариации совместно с рассчитанной скоростью, с поправкой за сезонные вариации совместно с рассчитанной скоростью, а также априорная скорость станции PIN1 по оси U и сама поправка за сезонные вариации.

Разность априорной и вычисленной скоростей при учете сезонных вариаций уменьшилась на 34 %. Исходя из этого, можно сделать вывод, что в ряде случаев расхождение априорной и вычисленной скоростей по высоте связано с периодическими движениями станции.

16 ITRF2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://itrf.ign.fr/en/solutions/itrf2020/description/more (дата обращения: 19.05.2025).

Рис. 4
График смещения станции PIN1 относительно первой эпохи по оси U

Fig. 4
Plot of the displacement of station PIN1 relative to the first epoch along the U-axis

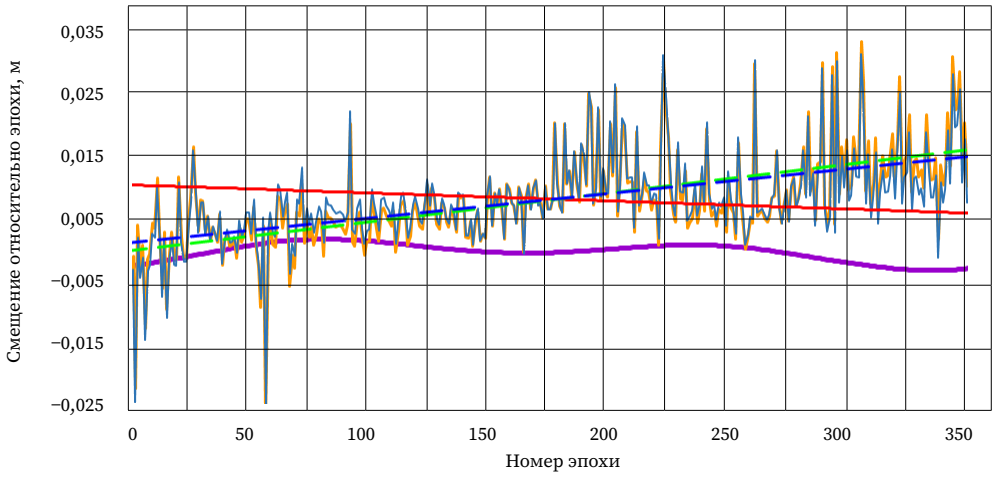


В ряде случаев разности, превышающие предельную погрешность, могут быть обусловлены особенностями априорных скоростей. Для станций HOLP и ROCK последние значения скоростей на ITRF приведены за 2021 год, для станции LBCH — за 2019 год, а для станции BILL — за 2020 год. Это связано с отсутствием данных за последующие периоды, а также с тем, что по новым измерениям, полученным после длительного перерыва, расчет актуальных скоростей еще не выполнен. По станции CRFP на всем ее периоде предоставления данных на ITRF прослеживаются сильные изменения скорости, вызванные сейсмическими активностями в районе функционирования станции. Полученные данные по скоростям с ITRF могут существенно отличаться от реальной ситуации на 2023 год. Так, для станции HOLP просматривается сильное различие априорных и рассчитанных показателей (рис. 5).

Таким образом, с учетом всех рассмотренных факторов полученные результаты достаточно хорошо сходятся с априорными и свидетельствуют о корректной работе технологии периодического уравнивания.

Рис. 5
График смещения станции HOLP относительно первой эпохи по оси U

Fig. 5
Plot of the displacement of station HOLP relative to the first epoch along the U-axis



4 Выводы

В ходе работы созданы методика и технология автоматизированного периодического уравнивания сети постоянно действующих спутниковых геодезических станций, позволяющие обеспечить высокоточное определение координат пунктов с минимальными временными и трудовыми затратами. Работоспособность технологии и возможность ее успешного применения для решения рассматриваемых задач доказана в ходе экспериментальной апробации. По результатам

исследования можно сделать следующие выводы о соответствии методики требованиям и критериям оценки эффективности, установленным в работе:

1. Разработанные методика и технология позволяют производить автоматизированное периодическое уравнивание сети постоянно действующих спутниковых геодезических станций.
2. Разработанная программная реализация помогает полностью автоматизировать процесс подготовки данных, их уравнивания в Bernese и передачи результатов на FTP-сервер, исключая необходимость ручного вмешательства оператора и возможность возникновения связанных с этим ошибок.
3. Применение автоматизированного подхода к периодическому уравниванию геодезических сетей повышает производительность по сравнению с аналогичной работой оператора в интерактивном режиме на 65,3 %. Это особенно важно для задач оперативного мониторинга, где своевременность результатов критична (при выявлении аномальных смещений в сейсмоактивных регионах)[17]. Оценка эффективности получена по результатам хронометражных исследований, выполненных в процессе апробации.
4. Использование данной технологии возможно в широком спектре задач, включая периодическое переуравнивание СДГС, геодинамические исследования, контроль целостности сетей, выявление смещений и скоростей движений пунктов, а также предоставление SINEX-файлов и координат на актуальную эпоху конечным пользователям.
5. Рассчитанные скорости рассматриваемых станций достаточно хорошо сходятся с данными реализации системы отсчета ITRF2020.
6. СКП для рассматриваемых станций в плане варьируется на интервале 5,838–13,244 мм, а по высоте — 1,589–9,758 мм. Согласно техническому отчету IGS[17], для мониторинга тектонических движений СКП определения координат не должна превышать 10 мм в плане и 20 мм по высоте. Таким образом, разработанная технология обеспечивает точность, достаточную для выявления смещений, превышающих фоновый уровень шума (постсейсмических деформаций); оценки скоростей с погрешностью, сопоставимой с ITRF2020 (табл. 2); использования в задачах поддержания национальных систем отсчета.

Предложенная технология ориентирована на научно-исследовательские и государственные центры обработки ГНСС-данных, имеющие лицензию на использование Bernese GNSS Software или GAMIT/GLOBK, а также ведущие собственные разработки программного обеспечения для уравнивания СГС. При этом предложенная в работе методика и разработанная технология могут быть использованы в совокупности с другим существующим или разрабатываемым программным обеспечением уравнивания.

Предлагаемые решения вносят вклад в развитие методов и технологий уравнивания путем методологического обеспечения надежного и воспроизводимого применения процесса уравнивания в условиях длительной автоматизированной эксплуатации. В ходе дальнейших исследований планируется расширить функционал приложения за счет интеграции дополнительных источников данных, оптимизации обработки больших массивов информации. Кроме того, предполагается применять разработанную технологию в геодинамических исследованиях с целью мониторинга деформаций и движений земной коры на основе анализа временных рядов координат пунктов СДГС.

библиография

1. Побединский Г.Г., Столяров И.А. Современное состояние государственной системы геодезического обеспечения Российской Федерации и основные направления ее развития // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Международный научный конгресс. Пленарное заседание: сборник материалов. Новосибирск: СГУГиТ, 2017. С. 14–27.

17 International GNSS Service Technical Report 2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://files.igs.org/pub/resource/technical_reports/2020_techreport.pdf (дата обращения: 03.06.2025).

2. Мазурова Е.М., Антонович К.М., Лагутина Е.К. и др. Анализ состояния государственной геодезической сети России с учетом существующих и перспективных требований // Вестник СГУГиТ. 2014. № 3 (27). С. 84–89.
3. Карпик А.П., Дюбанов А.В., Твердовский О.В. Обзор состояния использования и развития сетей референцных станций на основе инфраструктуры ГЛОНАСС в России // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Международный научный конгресс: Международная научная конференция «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сборник материалов: в 3 т. Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. С. 176–182.
4. Карпик А.П., Антонович К.М., Твердовский О.В. и др. Создание сети референцных станций для обеспечения мониторинга объектов транспорта нефти и нефтепродуктов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Международный научный конгресс: Пленарное заседание: сборник материалов. Новосибирск: СГГА, 2014. С. 151–161.
5. Дорогова И.Е. Влияние выбора исходных пунктов на результаты уравнивания повторных геодезических измерений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Международный научный конгресс: Международная научная конференция «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сборник материалов: в 2 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2015. Т. 1. С. 209–213.
6. Баглай И.В., Негер О.В. Исследование точности спутникового позиционирования на примере сформированной дифференциальной сети // Аспирантские чтения: сборник научных статей аспирантов РУТ (МИИТ). М.: Перо, 2021. Вып. 4. С. 9–14.
7. Гордеев В.А., Раева О.С. Уравнивание и оценка точности GPS-построений // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2016. № 6. С. 41–47.
8. Дорогова И.Е., Духовников К.С. Программное обеспечение, сервисы и открытый код для решения задач геодинамики // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Международный научный конгресс: сборник материалов: в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2022. Т. 1. С. 138–145. DOI:10.33764/2618-981X-2022-1-138-145.
9. Cetin S., Aydin C., Doğan U. Comparing GPS Positioning Errors Derived from GAMIT/GLOBK and Bernese GNSS Software Packages: A Case Study in CORS-TR in Turkey // Survey Review. 2018. Vol. 51. Iss. 369. P. 533–543. DOI:10.1080/00396265.2018.1505349.
10. Yu Li. Analysis of GAMIT/GLOBK in High-Precision GNSS Data Processing for Crustal Deformation // Earthquake Research Advances. 2021. Vol. 1. Iss. 3. P. 100028. DOI:10.1016/j.eqrea.2021.100028.
11. Lee S.-J., Yun H.-S. Towards Geodetic Datum Modernization: A Comparative Study of GNSS Solutions in KGD2002 Using GAMIT/GLOBK and Bernese // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. Iss. 12. P. 6460. DOI:10.3390/app15126460.
12. Jivall L., Nilfouroushan F., Al Munaizel N. Analysis of 20 Years of GPS Data from SWEREF Consolidation Points – Using BERNESE and GAMIT-GLOBK Software. Gävle: Typography and layout Rainer Hertel, 2022. 84 p.
13. Araszkiewicz A., Figurski M., Kroszczyński K. Combining of GNSS Solutions from BERNESE and GAMIT Software // Geophysical Research Abstracts. 2010. Vol. 12. P. 4588.
14. Петрушов А.А., Смирнов В.Б., Михайлов В.О. и др. Особенности проявления аномалий сейсмического режима перед сильными землетрясениями Калифорнии // Физика Земли. 2024. № 5. С. 113–128. DOI:10.31857/S0002333724050084.
15. Debnath P., Karmakar M., Khan M.T., et al. Seismic Activity Analysis in California: Patterns, Trends, and Predictive Modeling // Journal of Computer Science and Technology Studies. 2024. Vol. 6. Iss. 5. P. 50–60. DOI:10.32996/jcsts.2024.6.5.5.

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

Коробова Алиса Сергеевна
korobova.al@mail.ru
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра прикладной геодезии, геодезический факультет
0009-0001-3454-3666

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 09.06.2025. Принята к публикации 23.06.2026. Опубликована 30.06.2026.

UDC 528.1
DOI:10.30533/GiA-2026-024

CC BY

Development of a Methodology and Technology for Automated Periodic Adjustment of a Network of Permanent Satellite Geodetic Stations

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

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

citation Kupriyanov AO, Korobova AS, Morozov DA, Zamogilny D. Development of a Methodology and Technology for Automated Periodic Adjustment of a Network of Permanent Satellite Geodetic Stations. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2026;70(3): 23–41. DOI:10.30533/GiA-2026-024.

keywords satellite geodetic network adjustment, periodic adjustment, technology of adjustment automation, processing of global navigation satellite system, continuously operating reference station, station velocity

abstract To determine station velocities and monitor the integrity of satellite geodetic networks, periodic network adjustments are required. This study focuses on the development of a methodology and technology for automated periodic adjustment of a network of differential geodetic stations (CORS). The proposed methodology is based on the use of Bernese GNSS Software, its Bernese Processing Engine, and custom-developed software implemented in Python. The developed technology enables fully automated network adjustment of satellite observations, including downloading all necessary input data, processing, and publishing of solution files in SINEX format (Solution INdependent EXchange) on an FTP server. Using this approach, a test adjustment was carried out for a subset of 12 IGS stations over a 365-day period from January 1, 2023, to December 31, 2023. Station velocities were calculated together with their root mean square errors (RMS) in a topocentric horizontal coordinate system (ENU), and displacement analysis of network stations was performed based on adjusted coordinates relative to the initial epoch. This methodology can be effectively applied in geodynamic research, integrity monitoring of CORS networks, detection of station displacements, and computation of site velocity vectors.

references

1. Pobedinskii GG, Stolyarov IA. Sovremennoe sostoyanie gosudarstvennoi sistemy geodezicheskogo obespecheniya Rossiiskoi Federatsii i osnovnye napravleniya ee razvitiya [Modern Status of the State System of Geodesic Support of the Russian Federation and the Main Directions of Its Development]. *Interexpo GEO-Siberia-2017. XIII International Scientific Congress. Plenary Settlement: collection of materials.* Novosibirsk: SGUGiT; 2017: 14–27. (In Russian).

2. Mazurova EM, Antonovich KM, Lagutina EK, et al. Analiz sostoyaniya gosudarstvennoi geodezicheskoi seti Rossii s uchetom sushchestvuyushchikh i perspektivnykh trebovanii [Analysis of the State of the National Geodetic Network of Russia Considering Existing and Prospective Requirements]. ***Vestnik SSUGT.*** 2014;3(27): 84–89. (In Russian).
3. Karpik AP, Dyubanov AV, Tverdovskii OV. Obzor sostoyaniya ispol'zovaniya i razvitiya setei referentsnykh stantsii na osnove infrastruktury GLONASS v Rossii [Review of Reference Systems Use and Development on the Basis of Russian GLONASS Infrustructure]. ***Interexpo GEO-Siberia-2012. VIII International Scientific Congress: Proceedings of the International Scientific Conference "Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Surveying".*** In 3 vols. Vol. 1. Novosibirsk: SSGA; 2012: 176–182. (In Russian).
4. Karpik AP, Antonovich KM, Tverdovskii OV, et al. Sozdanie seti referentsnykh stantsii dlya obespecheniya monitoringa ob"ektov transporta nefti i nefteproduktov [Creating Reference Station Network for Monitoring Objects and Oil Transportation]. ***Interexpo GEO-Siberia-2014. X International Scientific Congress. Plenary Settlement: collection of materials.*** Novosibirsk: SSGA; 2014: 151–161. (In Russian).
5. Dorogova IE. Vliyanie vybora iskhodnykh punktov na rezul'taty uravnivaniya povtornykh geodezicheskikh izmerenii [Influence of the Choice of Initial Points on the Results of Adjustment of Repeated Geodetic Measurements]. ***Interexpo GEO-Siberia-2015. XI International Scientific Congress: Proceedings of the International Scientific Conference "Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Surveying".*** In 2 vols. Vol. 1. Novosibirsk: SSUGT; 2015: 209–213. (In Russian).
6. Baglai IV, Neger OV. Issledovanie tochnosti sputnikovogo pozitsionirovaniya na primere sformirovannoi differentsial'noi seti [Study of the Accuracy of Satellite Positioning Using the Example of a Formed Differential Network]. ***Postgraduate Readings: a collection of scientific articles by graduate students of the Russian University of Transport (MIIT).*** Moscow: Pero; 2021(4): 9–14. (In Russian).
7. Gordeev VA, Raeva OS. Uravnivanie i otsenka tochnosti GPS-postroenii [Adjustment and Accuracy Assessment of GPS Constructions]. ***Minerals and Mining Engineering.*** 2016;6: 41–47. (In Russian).
8. Dorogova IE, Dukhovnikov KS. Programmnoe obespechenie, servisy i otkrytyi kod dlya resheniya zadach geodinamiki [Software, Services, and Open Source for Solving Geodynamic Problems]. ***Interexpo Geo-Siberia. Proceedings of the XVIII International Scientific Congress.*** In 8 vols. Vol. 1. Novosibirsk: SSUGT; 2022: 138–145. (In Russian). DOI:10.33764/2618-981X-2022-1-138-145.
9. Cetin S, Aydin C, Doğan U. Comparing GPS Positioning Errors Derived from GAMIT/GLOBK and Bernese GNSS Software Packages: A Case Study in CORS-TR in Turkey. ***Survey Review.*** 2018;51(369): 533–543. DOI:10.1080/00396265.2018.1505349.
10. Yu Li. Analysis of GAMIT/GLOBK in High-Precision GNSS Data Processing for Crustal Deformation. ***Earthquake Research Advances.*** 2021;1(3): 100028. DOI:10.1016/j.eqrea.2021.100028.
11. Lee SJ, Yun HS. Towards Geodetic Datum Modernization: A Comparative Study of GNSS Solutions in KGD2002 Using GAMIT/GLOBK and Bernese. ***Applied Sciences.*** 2025;15(12): 6460. DOI:10.3390/app15126460.
12. Jivall L, Nilfouroushan F, Al Munaizel N. ***Analysis of 20 Years of GPS Data from SWEREF Consolidation Points – Using BERNESE and GAMIT-GLOBK Software.*** Gävle: Typography and layout Rainer Hertel; 2022. 84 p.
13. Araszkiewicz A, Figurski M, Kroszczyński K. Combining of GNSS Solutions from BERNESE and GAMIT Software. ***Geophysical Research Abstracts.*** 2010;12: 4588.
14. Petrushov AA, Smirnov VB, Mikhailov VO i dr. Osobennosti proyavleniya anomalii seismicheskogo rezhima pered sil'nymi zemletryaseniyami Kalifornii [Features of Seismicity Anomalies before Strong Earthquakes in California]. ***Izvestiya, Physics of the Solid Earth.*** 2024;5: 113–128. (In Russian). DOI:10.31857/S0002333724050084.
15. Debnath P, Karmakar M, Khan MT, et al. Seismic Activity Analysis in California: Patterns, Trends, and Predictive Modeling. ***Journal of Computer Science and Technology Studies.*** 2024;6(5): 50–60. DOI:10.32996/jcsts.2024.6.5.5.

authors

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

Alisa S. Korobova
korobova.al@mail.ru
Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Applied Geodesy, Faculty of Geodesy
0009-0001-3454-3666

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: June 9, 2025. Accepted: June 23, 2026. Published: June 30, 2026.

УДК 528.77
DOI:10.30533/GiA-2026-025

CC BY

Комбинированный метод сегментации сельхозугодий на радиолокационных изображениях с использованием фильтрации спекл-шума и алгоритмов глубокого машинного обучения

Р.В. Ларионов[1], **В.В. Хрящев**[1]✉, **А.Л. Приоров**[1]

[1] Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Ярославль, Россия
✉ v.khryashchev@uniyar.ac.ru

цитирование Ларионов Р.В., Хрящев В.В., Приоров А.Л. Комбинированный метод сегментации сельхозугодий на радиолокационных изображениях с использованием фильтрации спекл-шума и алгоритмов глубокого машинного обучения // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 3. С. 42–54. DOI:10.30533/GiA-2026-025.

ключевые слова аэрокосмическое изображение, Sentinel-1, фильтрация изображений, спекл-шум, нейронная сеть, сегментация сельхозугодий

аннотация Исследуется задача сегментации сельскохозяйственных угодий на радиолокационных изображениях (*англ.* Synthetic Aperture Radar, SAR), которые, в отличие от оптических, позволяют получать данные независимо от погодных условий и времени суток, но подвержены влиянию спекл-шума, существенно затрудняющего автоматический анализ. Проведено сравнительное исследование трех алгоритмов фильтрации спекл-шума. Оценка на панхроматических изображениях с моделируемым мультипликативным шумом по метрикам PSNR, ENL и SMPI показала, что фильтр BM3D обеспечивает наилучший баланс между подавлением шума и сохранением текстурных деталей, что подтверждается максимальным приростом метрики PSNR и снижением метрики SMPI. На основе собранного со спутника Sentinel-1 SAR набора данных проведены эксперименты по сегментации сельхозугодий с использованием современных нейросетевых архитектур SegNeXt-L и AerialFormer-B. Применение предварительной фильтрации BM3D помогло несколько улучшить метрики качества (Dice и F1), а также ускорить сходимость нейросетевых моделей. Дальнейшая модификация архитектуры AerialFormer-B путем разделения кодировщиков для каждого канала поляризации (VV и VH) обеспечила более эффективное извлечение признаков, что позволило повысить метрику Dice до 0,70, а F1 — до 0,46.

1 Введение

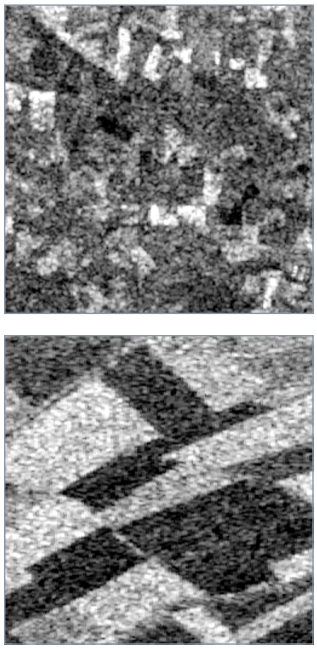
В настоящее время применение данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в сельском хозяйстве связано с непрерывным получением различных физических показателей земной поверхности, мониторингом экологической обстановки, отслеживанием динамики роста различных культур и др. [1, 2]. В частности, внимания заслуживает использование изображений микроволнового С-диапазона, полученных с помощью радара с синтезированной апертурой (*англ.* Synthetic Aperture Radar, SAR) [3, 4]. За счет применения указанного диапазона рабочих частот исчезает зависимость съемки от погодных условий, времени суток, степени облачности. Кроме того, появляется возможность получать изображения с высоким пространственным разрешением и с несколькими типами поляризации. Однако получение изображений в данном частотном диапазоне подвержено интенсивному влиянию спекл-шума [5]. Он представляет собой неотъемлемую текстурную составляющую радиолокационных изображений синтезированной апертуры, обусловленную когерентной природой съемки. Данный феномен характерен для всех систем когерентной визуализации (лазерная и ультразвуковая диагностика) и возникает вследствие интерференции электромагнитных волн [6]. Физическая сущность процесса заключается:

- в субпиксельной неоднородности (элемент разрешения [пиксель] SAR-изображения интегрирует сигнал от множества элементарных рассеивателей, расположенных на подстилающей поверхности: лиственного покрова, почвенных агрегатов, антропогенных объектов и т. д.);
- когерентном зондировании (спутник излучает когерентный зондирующий сигнал, характеризующийся постоянной начальной фазой);
- интерференционной природе (отраженные сигналы от различных рассеивателей в пределах одного разрешаемого объема суммируются на приемной апертуре когерентно; результирующая амплитуда сигнала зависит от разности фаз приходящих волн: при синфазном сложении наблюдается конструктивная интерференция, формирующая «яркие» пиксели, при противофазе возникает деструктивная интерференция, приводящая к взаимному гашению сигналов и появлению «темных» пикселей; именно эта случайная интерференционная картина и визуализируется как спекл-шум).

Данный случайный процесс интерференции в пределах одного пикселя и создает зернистый вид изображения, когда соседние пиксели могут иметь кардинально разную яркость, даже если они относятся к одному и тому же типу поверхности[1]. Примеры SAR-изображений с демонстрацией зернистой структуры представлены на рис. 1.

Рис. 1
Примеры спутниковых SAR-изображений со спекл-шумом

Fig. 1
Examples of speckled SAR-images



В отличие от аддитивного шума, спекл-шум является мультипликативным, что серьезно затрудняет визуальную интерпретацию и автоматический анализ изображений, поэтому практически любой процесс обработки SAR-данных предваряется попыткой подавления или фильтрации спекл-шума [7]. Текущее исследование начинается с анализа именно этой задачи, чтобы затем перейти к изучению влияния фильтрации спекл-шума на качество сегментации объектов сельхозугодий.

2 Материалы и методы

2.1 Алгоритмы фильтрации спекл-шума

Эффективное подавление спекл-шума на SAR-изображениях имеет важное значение для задачи сегментации спутниковых изображений. Этой теме

1 Шовенгерд Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2013. 564 с.

посвящено множество работ. Разработку фильтра спекл-шума затрудняет тот факт, что SAR-изображения содержат шум всегда, т. е. не существует чистых изображений [8]. В связи с этим выбор цифрового фильтра и оценка качества удаления шума произведены на спутниковых панхроматических изображениях оптического диапазона. Для моделирования шума использована следующая математическая модель [9]:

$$noised_signal(x) = signal(x) \times F(x), \quad (1)$$

где $noised_signal$ — зашумленное изображение;
$signal$ — исходное изображение;
F — случайное распределение с единичным математическим ожиданием (в текущей работе использовано нормальное распределение).

В качестве исследуемых фильтров рассмотрены классический пространственный фильтр Ли[2], фильтр на основе опорных векторов BM3D (*англ.* Block-Matching and 3D Filtering) [10] и нейросетевой фильтр на базе трансформера SAR-Transformer [11].

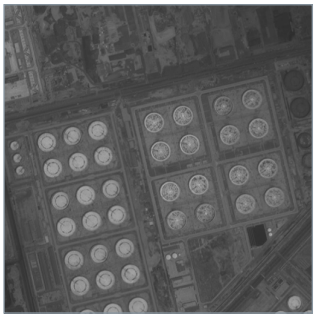
Фильтр Ли основан на статистическом подходе и использует локальные статистические свойства изображения для адаптивного сглаживания. Сохранение границ обеспечивается тем, что фильтр Ли базируется на локальной статистике, поэтому способен сохранять важные края и границы объектов, которые могут быть размыты традиционными методами сглаживания.

Фильтр BM3D — метод удаления шума из изображений, использующий сопоставление блоков и 3D-фильтрацию [10]. Он работает в четыре этапа (группировка, 3D-преобразование и фильтрация, обратное преобразование, агрегация). Преимуществами данного типа фильтра являются высокая эффективность, сохранение деталей и гибкость (возможность адаптации для работы с различными типами шума), недостатками — относительно высокая вычислительная сложность и чувствительность к параметрам [12].

Алгоритм SAR-Transformer представляет собой модификацию классической архитектуры трансформера с заменой абсолютного позиционного кодирования сверточным [11]. Данная гибридная архитектура существенно повышает устойчивость модели к радиофизическим помехам и обеспечивает высокую точность распознавания объектов по сравнению с классическими линейными фильтрами и сверточными нейронными сетями.

Рис. 2
Исследуемые панхроматические изображения

Fig. 2
Panchromatic test images



При тестировании использованы два панхроматических изображения (рис. 2), зашумленные с различными значениями дисперсии шума (var): 0,075; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,75; 1.

Для оценки качества фильтрации рассчитывались универсальная метрика пикового отношения сигнала к шуму (*англ.* Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR) и специфические для спекл-шума метрики: эквивалентное число наблюдений (*англ.* Equivalent Number of Looks, ENL) и индекс подавления спекла и сохранения среднего значения (*англ.* Speckle Suppression and Mean Preservation Index, SMPI) [13]. Метрика ENL характеризует уровень сглаживания изображения. Чем выше ее значение, тем меньше шума на изображении и больше сглаженность. Метрика SPMI измеряет разницу в уровне шума с сохранением среднего значения между двумя изображениями. Чем ниже значение метрики SMPI, тем лучше результаты фильтрации.

2.2 Тестовая база изображений со спутника Sentinel-1 SAR

Собранный набор данных для экспериментов состоит из 27 шестнадцатибитных спутниковых снимков европейской части России, полученных со спутника

2 Lee J. Digital Image Enhancement and Noise Filteringby Use of Local Statistics // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1980. Vol. 2. Iss. 2. P. 165–168.

Sentinel-1 SAR в 2020–2022 годах. Каждый снимок покрывал пространственную область размером приблизительно 200 на 300 км с разрешением 10 м на пиксель. Спутниковый снимок включал два канала: VV (излучаются и принимаются вертикальные волны) и VH (излучаются вертикальные волны и принимаются горизонтальные волны). При формировании изображений проводилась предобработка, состоящая из удаления теплового шума и шума по краям изображения, радиометрической калибровки и геометрической коррекции [14]. Каждому изображению назначалась экспертная бинарная маска, выделяющая области с сельхозугодьями. Для тестирования случайным образом выбраны два изображения, все остальные использовались в целях обучения. При формировании обучающего и тестового наборов все изображения разделены на фрагменты размером 512×512 пикселей с шагом 256 пикселей. Статистика полученных наборов представлена в табл. 1, примеры фрагментов и соответствующих им бинарных масок — на рис. 3. Для лучшей визуализации изображений к двухканальным SAR-изображениям добавлен третий канал, полученный делением VH на VV (VH/VV).

Таблица 1
Статистика собранного набора SAR-изображений

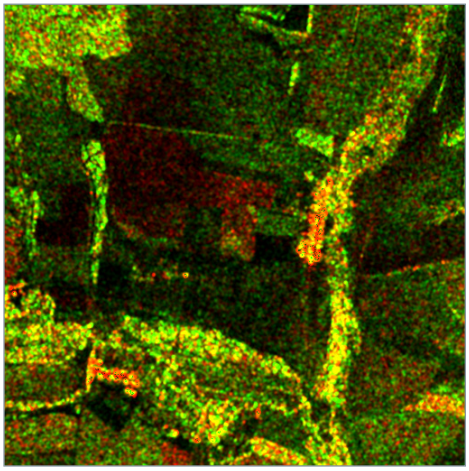
Table 1
Description of SAR images dataset

Выборка	Количество изображений с разрешением 512×512 пикселей		
	всего	с классом «сельхозугодья»	без класса «сельхозугодья»
Обучающая	23 169	20 196	2 973
Тестовая	1 391	1 281	110

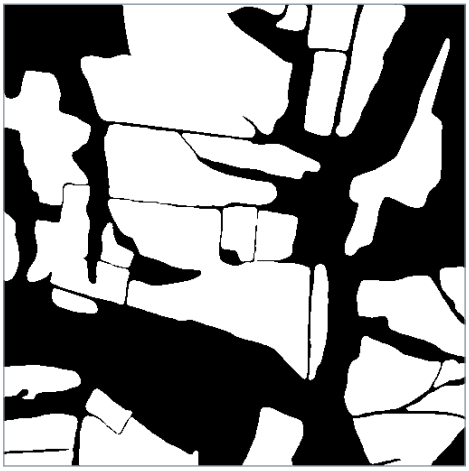
Рис. 3
Примеры размеченных изображений и соответствующих бинарных масок

Fig. 3
Example of labelled image and binary mask

Изображения Sentinel-1 / Sentinel-1 image



Бинарные маски с выделенным классом сельхозугодий / Binary mask of agricultural fields



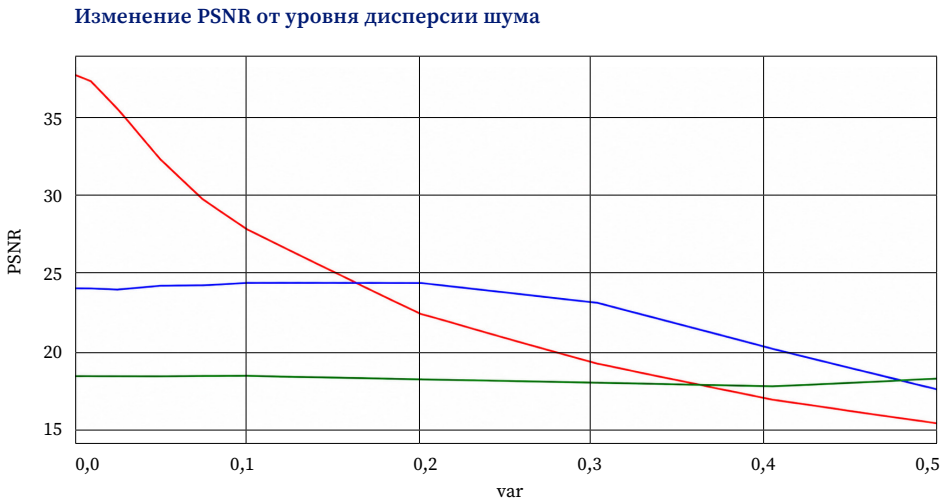
3 Результаты и обсуждение

3.1 Результаты исследования алгоритмов фильтрации спекл-шума

Графики, приведенные на рис. 4, показывают зависимость метрики PSNR от уровня дисперсии для трех фильтров. Полученные данные свидетельствуют о том, что при низких степенях зашумления лучший результат показывает фильтр Ли, а при значениях дисперсии выше 0,2 преимущество имеет фильтр BM3D. Однако результаты оценки качества только по метрике PSNR не всегда хорошо коррелируют с визуально наблюдаемым качеством, поэтому важно учитывать и значения других объективных и субъективных метрик.

Рис. 4
Зависимость метрики PSNR от уровня дисперсии для исследуемых фильтров

Fig. 4
PSNR curve as a function of dispersion level



В связи с этим в табл. 2 представлены результаты по трем указанным метрикам для значения дисперсии var = 0,3. Анализ приведенных данных показывает, что алгоритм BM3D обеспечивает наилучший баланс метрик качества. В частности, для первого изображения фильтрация методом BM3D дает наибольший прирост PSNR (с 17,37 до 23,18 дБ) и максимальное снижение индекса SMPI (с 4,34 до 1,99). В то же время нейросетевой алгоритм SAR-Transformer показывает аномально высокий скачок метрики ENL (с 7,44 до 491,19), что свидетельствует о чрезмерном сглаживании текстуры и критической потере семантической информации об объектах. Пространственный фильтр Ли демонстрирует промежуточные значения, уступая BM3D по эффективности подавления шума. Для второго изображения ситуация повторяется.

Таблица 2
Значения метрик оценки качества при фильтрации спекл-шума

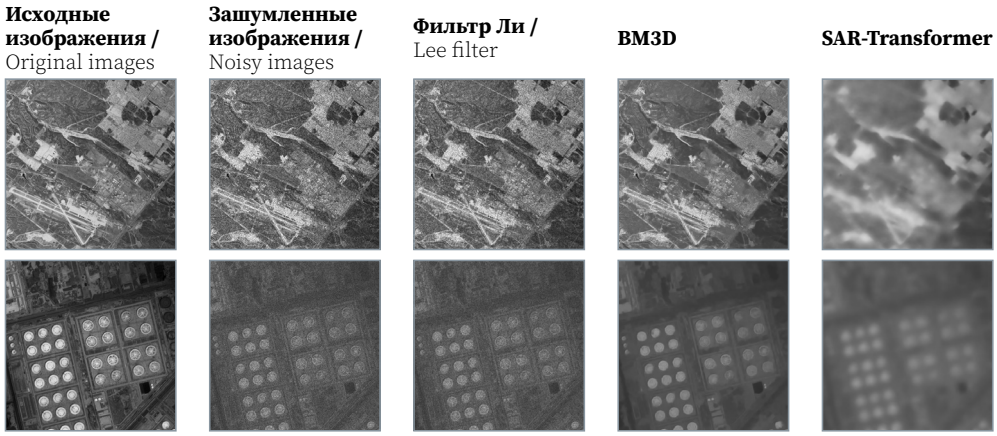
Table 2
Quality assessment metrics of despeckling

Метрика	+Шум	lee_enhanced	BM3D	SAR-Transformer
Обработка первого изображения на рис. 2				
PSNR, дБ	17,37	21,67	23,18	18,09
ENL	7,44	18,26	36,93	491,19
SMPI	4,34	2,93	1,99	3,47
Обработка второго изображения на рис. 2				
PSNR, дБ	17,76	16,56	14,67	14,49
ENL	18,62	60,27	150,55	469,75
SMPI	18,19	10,64	2,42	2,87

На рис. 5 представлены тестовые изображения и результаты фильтрации для значения дисперсии var = 0,3. Оценка визуальных результатов также показывает превосходство фильтра BM3D, который выбран для дальнейшей работы.

Рис. 5
Фрагменты тестовых изображений после фильтрации

Fig. 5
Test filtered images



3.2 Результаты моделирования алгоритмов сегментации

На собранной базе изображений обучены и протестированы две нейросетевые модели, хорошо зарекомендовавшие себя в распознавании объектов на спутниковых изображениях: сверточная сеть с механизмами внимания SegNeXt-L [15] и трансформер AerialFormer-B [16]. Для оценки качества работы нейросетевых моделей использовался ряд стандартных метрик: коэффициент подобия Серенсена (Dice), метрика отношения пересечения к объединению (Intersection over Union, IoU) и адаптированные для задачи сегментации стандартные метрики детектирования на уровне объектов: точность (Precision, P), полнота (Recall, R) и F-мера 1-го рода (F1) [17]. Все эти показатели принимают значения из интервала [0, 1] и рассчитываются следующим образом:

2 $$dice = 2\frac{X \cap Y}{|X|+|Y|},$$

где X — множество пикселей эталонной маски;
Y — множество пикселей, предсказанных алгоритмом;
$|X \cap Y|$ — количество элементов, присутствующих в обоих множествах;

3 $$IoU = \frac{S_{int}}{S_{union}},$$

где S_{int} и S_{union} — площади пересечения и объединения между экспертной разметкой и обнаружением, предсказанным алгоритмом;

4 $$P = \frac{TP}{TP+FN},$$
5 $$R = \frac{TP}{TP+FP},$$
6 $$F1 = 2\frac{P \times R}{P+R},$$

где TP (True Positive) — количество правильно определенных объектов;
FN (False Negative) — количество пропущенных объектов;
FP (False Positive) — количество ложных срабатываний на уровне объектов (распознанный объект трактуется как истинноположительный, если предсказание алгоритма пересекается с объектом из эталонной маски более, чем на 0,5 по метрике IoU).

Обучение алгоритмов произведено на протяжении 500 эпох с размером обучающего пакета 16 для изображений разрешением 512×512 пикселей. В качества алгоритма оптимизации использован AdamW с начальной скоростью обучения 0,001 и уменьшающейся до нуля по косинусу и L2-регуляризацией. При обучении использованы методики, апробированные в предыдущих работах коллектива авторов [14, 18]: адаптивное формирование батча, использование дополнительного класса «узкая область между объектами», если расстояние между полями менее трех пикселей, маска границ полей при расчете функции потерь с увеличенным весом для границ полей. Для сравнения обучение проведено на изображениях с фильтрацией спекл-шума при помощи фильтра BM3D и без фильтрации. Результаты тестирования представлены в табл. 3.

Видно, что алгоритм AerialFormer-B показывает лучшие результаты при обучении без фильтрации изображений, в этом случае метрики Dice и F1 достигают значений 0,65 и 0,39 соответственно. Применение предварительной фильтрации с использованием фильтра BM3D позволяет улучшить показатели на 0,02 по метрике Dice и на 0,03 — по метрике F1. Таким образом, использование предварительной фильтрации несколько улучшает качество работы алгоритмов сегментации. Графики изменения значения функции потерь архитектуры AerialFormer-B на обучающем наборе представлены на рис. 6. Из них следует, что использование фильтрации не только несколько увеличивает итоговое качество алгоритма сегментации, но и позитивно влияет на скорость обучения.

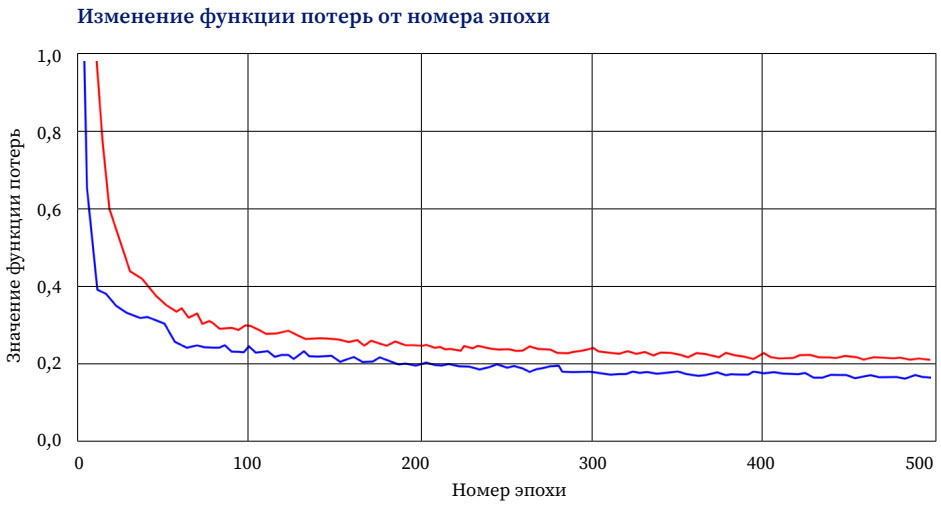
Таблица 3
Результаты тестирования нейронных сетей SegNeXt-L и AerialFormer-B

Table 3
Test results of neural networks SegNeXt-L and AerialFormer-B

Алгоритм	Dice	F1
SegNeXt-L	0,61	0,32
SegNeXt-L + BM3D	0,62	0,32
AerialFormer-B	0,65	0,39
AerialFormer-B + BM3D	0,67	0,42

Рис. 6
Изменение функции потерь для нейросетевой архитектуры AerialFormer-B

Fig. 6
AerialFormer-B validation loss curve



Статистические характеристики спекл-шума, в частности его дисперсия, определяются исключительно числом некогерентных накоплений в процессе синтеза радиолокационного изображения. Данный параметр имеет строгое аналитическое описание и не превышает теоретического предела. Однако при анализе многоканальных данных (например, поляриметрических или многочастотных) необходимо учитывать, что шумовые компоненты в разных каналах коррелированы вследствие единого физического принципа их формирования [19]. Учет этой межканальной зависимости открывает возможности для модификации архитектуры AerialFormer-B с целью повышения эффективности фильтрации или анализа таких изображений.

Аналогично дизайну параллельного встраивания признаков для архитектуры HRNet [20] предлагаемая модификация архитектуры AerialFormer-B-m использует трансформер Swin в качестве сети извлечения признаков, но имеет две дополнительные ветви кодирования после входного слоя. Таким образом, признаки кодируются как в прямом направлении (размер остается прежним), так и в нисходящем (размер уменьшается). Те же блоки из оригинальной архитектуры дублируются в параллельных ветвях, так что каждая ветвь кодирования имеет одинаковое количество блоков трансформера и содержит богатую семантическую информацию. В конце происходит конкатенация извлеченных признаков. Предложенная схема модификации алгоритма AerialFormer-B-m приведена на рис. 7, а результаты сравнения с оригинальной версией представлены в табл. 4.

Таблица 4
Результаты сравнительного тестирования нейронной сети AerialFormer-B и предложенной модификации

Table 4
Test results of neural network AerialFormer-B and the proposed modification

Алгоритм	Dice	F1
AerialFormer-B	0,67	0,42
AerialFormer-B-m	0,70	0,46

Согласно полученным результатам, модификация архитектуры AerialFormer-B позволяет увеличить значения метрик на 0,03–0,04. Таким образом, возросшая почти вдвое вычислительная сложность алгоритма компенсируется выросшими значениями метрик. Результаты сегментации для фрагментов 512×512 пикселей представлены на рис. 8.

Результаты сегментации для оригинальных изображений, охватывающих область земной поверхности примерно 200×300 км, с использованием метода скользящего окна размером 512×512 пикселей и шагом 256 пикселей представлены на рис. 9.

Рис. 7
Схема работы модифицированного алгоритма AerialFormer-B-m

Fig. 7
Scheme of the AerialFormer-B-m modification

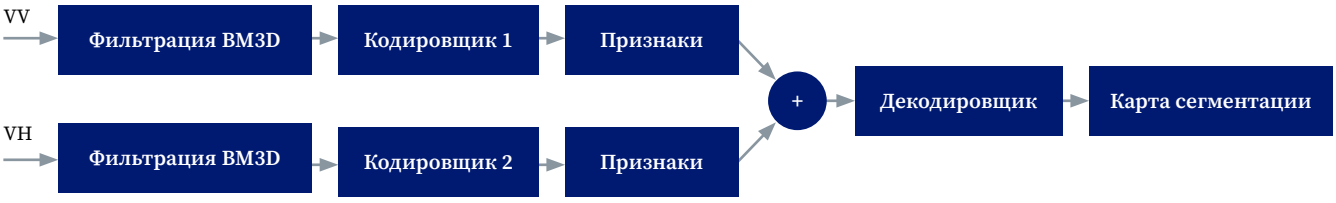
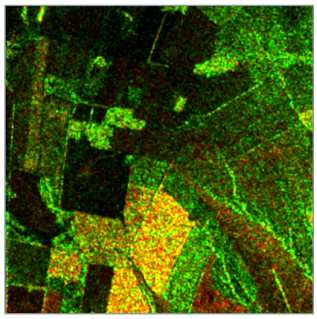


Рис. 8
Результаты работы модифицированного алгоритма на базе AerialFormer-B

Fig. 8
Segmentation result of developed algorithm

Оригинальное изображение /
Original image



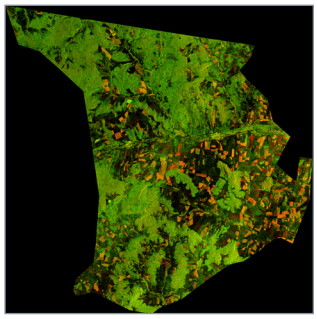
Эталонная маска /
Ground-truth mask

Результат сегментации /
Segmentation result

Рис. 9
Результат сегментации алгоритма AerialFormer-B-m для оригинального спутникового изображения Sentinel-1 SAR методом скользящего окна

Fig. 9
Segmentation result of the AerialFormer-B-m algorithm for the original Sentinel-1 SAR image using the sliding window method

Оригинальное изображение /
Original image



Бинаризованная маска сегментации /
Segmentation result

4 Выводы

В результате проведенного исследования решена задача повышения эффективности сегментации сельскохозяйственных угодий на радиолокационных изображениях со спутника Sentinel-1 SAR, подверженных влиянию спекл-шума.

На первом этапе работы проведено сравнение трех алгоритмов фильтрации: классического фильтра Ли, эталонного алгоритма BM3D и нейросетевого SAR-Transformer. Анализ стандартных метрик PSNR, ENL и SMPI на тестовых панхроматических изображениях с моделируемым мультипликативным шумом показал, что фильтр BM3D обеспечивает наилучший баланс между подавлением шума и сохранением текстурных деталей, что подтверждается максимальным приростом метрики PSNR, снижением метрики SMPI, а также визуальным сравнением результатов.

На втором этапе проведены эксперименты по сегментации сельхозугодий с использованием современных архитектур нейронных сетей SegNeXt-L и AerialFormer-B. Применение фильтра BM3D позволило несколько улучшить метрики сегментации Dice и F1 для обеих моделей, а также ускорить сходимость алгоритмов в процессе обучения. Дальнейшая модификация архитектуры AerialFormer-B путем разделения кодировщиков для каждого канала поляризации позволила более эффективно извлекать информацию, что привело к увеличению метрики Dice до 0,70, а F1 — до 0,46.

Полученные результаты имеют важное практическое значение для задач точного земледелия и мониторинга земель сельскохозяйственного назначения. Предложенный подход, включающий предварительную фильтрацию BM3D и специализированную архитектуру нейронной сети, позволяет автоматически и с высокой точностью выделять границы полей на радарных снимках вне зависимости от погодных условий и времени суток.

библиография

1. Баранова Д.В., Белоусов А.О., Павлова В.А. Автоматизация расчетов интегральной оценки рационального использования земель сельскохозяйственного назначения (на примере Новгородской области) // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 3. С. 122–135. DOI:10.30533/GiA-2025-031.
2. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А. и др. Система «ВЕГА-Science»: возможности работы с данными спутниковых наблюдений Земли для решения научных и прикладных задач // Земля и Вселенная. 2025. № 1-2 (361-362). С. 66–85. DOI:10.7868/S0044394825010050.
3. Tetteh G., Gocht A., Erasmi S., et al. Evaluation of Sentinel-1 and Sentinel-2 Feature Sets for Delineating Agricultural Fields in Heterogeneous Landscapes // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 116702–116719. DOI:10.1109/ACCESS.2021.3105903.
4. Балдина Е.А., Михайлюкова П.Г., Трошко К.А. Опыт использования данных радиолокационной космической съемки для создания тематических карт // Вестник Московского университета. 2019. Серия 5: География. 2019. № 4. С. 110–118.
5. Минаев А.С., Федоров В.В. Обратимая многошаговая диффузионная модель для преобразования изображений на основе радиолокационных и оптических данных // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». 2025. Т. 14, № 3. С. 249–255. DOI:10.26583/vestnik.2025.3.7.
6. Ширяев М.А., Балдина Е.А., Лурье И.К. Использование интерферометрических данных со спутника Sentinel-1A для выявления изменений высоты поверхности Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2024. Т. 68, № 3. С. 42–56. DOI:10.30533/GiA-2024-022.
7. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Козлов Е.П. и др. Повышение информативности космических изображений Земли: монография / под ред. В.В. Еремеева. М.: КУРС, 2022. 368 с.
8. Нафиева Е.Н., Гречищев А.В. Космические радиолокационные системы мониторинга Земли // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. 2020. Т. 2, № 5. С. 89–95. DOI:10.23885/2500-123X-2020-2-5-89-95.
9. Lopez-Martinez C., Fabregas X., Pottier E. Multidimensional Speckle Noise Model // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2005. Vol. 2005. P. 180956. DOI:10.1155/ASP.2005.3259.
10. Dabov K., Foi A., Katkovnik V., et al. Image Denoising by Sparse 3-D Transform-Domain Collaborative Filtering // IEEE Transactions on Image Processing. 2007. Vol. 16. Iss. 8. P. 2080–2095. DOI:10.1109/TIP.2007.901238.
11. Perera M., Bandara W., Valanarasu J., et al. Transformer-Based SAR Image Despeckling // IGARSS 2022–2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Kuala Lumpur: IEEE, 2022: 751–754. DOI:10.1109/IGARSS46834.2022.9884596.
12. MuraliMohanBabu Y., Subramanyam M.V., GiriPrasad M.N. A Modified BM3D Algorithm for SAR Image Despeckling // Procedia Computer Science. 2015. Vol. 70. P. 69–75. DOI:10.1016/j.procs.2015.10.038.
13. Wang X., Ge L., Li X. Evaluation of Filters for Envisat Asar Speckle Suppression in Pasture Area // ISPRS Annals of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2012. Vol. I-7. P. 341–346. DOI:10.5194/isprsannals-I-7-341-2012.
14. Сенников А.В., Ларионов Р.В., Хрящев В.В. и др. Исследование нейросетевых алгоритмов для сегментации водных участков на спутниковых SAR изображениях // Цифровая обработка сигналов. 2024. № 4. С. 83–88.
15. Guo M., Lu C., Hou Q., et al. SegNeXt: Rethinking Convolutional Attention Design for Semantic Segmentation // Advances in Neural Information Processing Systems 35: Proceedings of the 36th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2022). Red Hook: Curran Associates, 2022. P. 1140–1156. DOI:10.52202/068431-0084.
16. Hanyu T., Yamazaki K., Tran M., et al. AerialFormer: Multi-Resolution Transformer for Aerial Image Segmentation // Remote Sensing. 2024. Vol. 16. Iss. 16. P. 2930. DOI:10.3390/rs16162930.
17. Setiawan A.W. Image Segmentation Metrics in Skin Lesion: Accuracy, Sensitivity, Specificity, Dice Coefficient, Jaccard Index, and Matthews Correlation Coefficient // 2020 International Conference on Computer Engineering, Network,

and Intelligent Multimedia (CENIM). Surabaya: IEEE, 2020. P. 97–102. DOI:10.1109/CENIM51130.2020.9297970.
18. Larionov R., Kotov N., Priorov A., et al. Agricultural Fields Segmentation on Satellite Images Using Convolutional Neural Networks // 2021 IEEE East-West Design and Test Symposium. Batumi: IEEE, 2021. P. 1–4. DOI:10.1109/EWDTS52692.2021.9581006.
19. Бехтин Ю.С., Чинь В.Т. Сравнение эффективности различных типов вейвлетов при шумоподавлении изображений, полученных с помощью радаров с синтезированной апертурой // Актуальные проблемы современной науки и производства: материалы IX Всероссийской научно-технической конференции. Рязань: РГРТУ им. В.Ф. Уткина, 2024. С. 342–349.
20. Wang J., Sun K., Cheng T., et al. Deep High-Resolution Representation Learning for Visual Recognition // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2021. Vol. 43. Iss. 10. P. 3349–3364. DOI:10.1109/TPAMI.2020.2983686.

авторы

Ларионов Роман Васильевич
ФГБОУ ВО «Ярославский университет им. П.Г. Демидова» (ЯрГУ), Ярославль, Россия
кафедра цифровых технологий и машинного обучения,
физико-технический факультет
0000-0002-7132-135X

Хрящев Владимир Вячеславович
ФГБОУ ВО «Ярославский университет им. П.Г. Демидова» (ЯрГУ), Ярославль, Россия
кафедра цифровых технологий и машинного обучения,
физико-технический факультет
д-р техн. наук, доцент
0000-0003-2978-2459

Приоров Андрей Леонидович
ФГБОУ ВО «Ярославский университет им. П.Г. Демидова» (ЯрГУ), Ярославль, Россия
кафедра цифровых технологий и машинного обучения,
физико-технический факультет
д-р техн. наук, профессор
0000-0003-2984-340X

Поступила 02.04.2026. Принята к публикации 23.06.2026. Опубликована 30.06.2026.

UDC 528.8
DOI:10.30533/GiA-2026-025

CC BY

Hybrid Approach to Agricultural Land Segmentation on Radar Images Integrating Despeckling and Deep Learning

Roman V. Larionov[1], **Vladimir V. Khryaschev**[1]✉, **Andrey L. Priorov**[1]

[1] P.G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia
✉ v.khryashchev@uniyar.ac.ru

citation Larionov RV, Khryaschev VV, Priorov AL. Hybrid Approach to Agricultural Land Segmentation on Radar Images Integrating Despeckling and Deep Learning. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying.* 2026;70(3): 42–54. DOI:10.30533/GiA-2026-025.

keywords aerospace imagery, Sentinel-1, image filtering, speckle noise, neural network, agricultural land segmentation

abstract The problem of agricultural land segmentation on radar images (SAR) is investigated, which, unlike optical images, allow data to be obtained regardless of weather conditions and time of day, but are subject to speckle noise, which significantly complicates automatic analysis. A comparative study of three speckle noise filtering algorithms has been conducted. Evaluation on panchromatic images with simulated multiplicative noise using the PSNR, ENL, and SMPI metrics showed that the BM3D filter provides the best balance between noise suppression and preservation of textural details, which is confirmed by the maximum increase in the PSNR metric and a decrease in the SMPI metric. Based on the collected data set from the Sentinel-1 SAR satellite, experiments on farmland segmentation using modern neural network architectures SegNeXt-L and AerialFormer-B. The use of BM3D pre-filtering allowed us to slightly improve the quality metrics (Dice and F1), as well as accelerate the convergence of neural network models. Further modification of the AerialFormer-B architecture by separating encoders for each polarization channel (VV and VH) provided more efficient feature extraction, which increased the Dice metric to 0.70 and F1 to 0.46.

references

1. Baranova DV, Belousov AO, Pavlova VA. Avtomatizatsiya raschetov integral'noi otsenki ratsional'nogo ispol'zovaniya zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya (na primere Novgorodskoi oblasti) [Automation of Calculations of the Integrated Assessment of the Rational Use of Agricultural Land (Using the Example of the Novgorod Region)]. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying.* 2025;69(3): 122–135. (In Russian). DOI:10.30533/GiA-2025-031.
2. Lupian EA, Proshin AA, Burtsev MA, et al. Sistema “VEGA-Science”: vozmozhnosti raboty s dannymi sputnikovykh nablyudenii Zemli dlya resheniya nauchnykh i prikladnykh zadach [VEGA-Science System: Capabilities for Working with Earth Observation Satellite Data to Address Scientific and Applied Problems]. *Earth & Universe.* 2025;1-2(361-362): 66–85. (In Russian). DOI:10.7868/S0044394825010050.

3. Tetteh G, Gocht A, Erasmi S, et al. Evaluation of Sentinel-1 and Sentinel-2 Feature Sets for Delineating Agricultural Fields in Heterogeneous Landscapes. ***IEEE Access.*** 2021;9: 116702 116719. DOI:10.1109/ACCESS.2021.3105903.
4. Baldina EA, Mikhaylyukova PG, Troshko KA. Opyt ispol'zovaniya dannykh radiolokatsionnoi kosmicheskoi s"emki dlya sozdaniya tematicheskikh kart [Experience of Using Radar Satellite Imagery Data to Create Thematic Maps]. ***Moscow University Bulletin. Series 5, Geography.*** 2019;4: 110–118. (In Russian).
5. Minaev AS, Fedorov VV. Obratimaya mnogoshagovaya diffuzionnaya model' dlya preobrazovaniya izobrazhenii na osnove radiolokatsionnykh i opticheskikh dannykh [Reversible Multi-Step Diffusion Model for Image Translation Between Radar and Optical Data]. ***Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta "MIFI".*** 2025;14(3): 249–255. (In Russian). DOI:10.26583/vestnik.2025.3.7.
6. Shiryaev MA, Baldina EA, Lurie IK. Ispol'zovanie interferometricheskikh dannykh so sputnika Sentinel-1A dlya vyyavleniya izmenenii vysoty poverkhnosti Uzon-Geizernoi vulkano-tektonicheskoi depressii [Use of the Sentinel-1A Satellite DInSAR Data for Surface Elevation Changes Detection of the Uzon-Geyservolcano-Tectonic Depression]. ***Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying.*** 2024;68(3): 42–56. (In Russian). DOI:10.30533/GiA-2024-022.
7. Egoshkin NA, Eremeev VV, Kozlov EP, et al. ***Povyshenie informativnosti kosmicheskikh izobrazhenii Zemli*** [Increasing the Information Content of Satellite Images of the Earth] [monograph]. Eremeev VV. (ed.). Moscow: KURS; 2021. 368 p. (In Russian).
8. Nafieva EN, Grechishchev AV. Kosmicheskie radiolokatsionnye sistemy monitoringa Zemli [Space Radar Systems of Earth Monitoring]. ***Ecology Economy Informatics. Geoinformation Technologies and Space Monitoring.*** 2020;2(5): 89–95. (In Russian). DOI:10.23885/2500-123X-2020-2-5-89-95.
9. Lopez-Martinez C, Fabregas X, Pottier E. Multidimensional Speckle Noise Model. ***EURASIP Journal on Advances in Signal Processing.*** 2005;2005: 180956. DOI:10.1155/ASP.2005.3259.
10. Dabov K, Foi A, Katkovnik V, et al. Image Denoising by Sparse 3-D Transform-Domain Collaborative Filtering. ***IEEE Transactions on Image Processing.*** 2007;16(8): 2080–2095. DOI:10.1109/TIP.2007.901238.
11. Perera M, Bandara W, Valanarasu J, et al. Transformer-Based SAR Image Despeckling. ***IGARSS 2022–2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.*** Kuala Lumpur: IEEE; 2022: 751 754. DOI:10.1109/IGARSS46834.2022.9884596.
12. MuraliMohanBabu Y, Subramanyam M, GiriPrasad M. A Modified BM3D Algorithm for SAR Image Despeckling. ***Procedia Computer Science.*** 2015;70: 69–75. DOI:10.1016/j.procs.2015.10.038.
13. Wang X, Ge L, Li X. Evaluation of Filters for Envisat Asar Speckle Suppression in Pasture Area. ***ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.*** 2012;I-7: 341–346. DOI:10.5194/isprsannals-I-7-341-2012.
14. Sennikov AV, Larionov RV, Khryashchev VV, et al. Issledovanie neirosetevykh algoritmov dlya segmentatsii vodnykh uchastkov na sputnikovykh SAR izobrazheniyakh [Investigation of Neural Network Algorithms for Segmentation of Water Areas on Satellite SAR Images]. ***Digital Signal Processing.*** 2024;4: 83–88. (In Russian).
15. Guo M, Lu C, Hou Q, et al. SegNeXt: Rethinking Convolutional Attention Design for Semantic Segmentation. ***Advances in Neural Information Processing Systems 35: Proceedings of the 36th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2022).*** Red Hook: Curran Associates; 2022: 1140–1156. DOI:10.52202/068431-0084.
16. Hanyu T, Yamazaki K, Tran M, et al. AerialFormer: Multi-Resolution Transformer for Aerial Image Segmentation. ***Remote Sensing.*** 2024;16(16): 2930. DOI:10.3390/rs16162930.
17. Setiawan AW Image Segmentation Metrics in Skin Lesion: Accuracy, Sensitivity, Specificity, Dice Coefficient, Jaccard Index, and Matthews Correlation Coefficient. ***2020 International Conference on Computer Engineering, Network, and Intelligent Multimedia (CENIM).*** Surabaya: IEEE; 2020: 97–102. DOI:10.1109/CENIM51130.2020.9297970.
18. Larionov R, Kotov N, Priorov A, et al. Agricultural Fields Segmentation on Satellite Images Using Convolutional Neural Networks. ***2021 IEEE East-West Design and Test Symposium.*** Batumi: IEEE; 2021: 1–4. DOI:10.1109/EWDTS52692.2021.9581006.

19. Bekhtin YuS, Trinh VT. Sravnenie ehffektivnosti razlichnykh tipov veivletov pri shumopodavlenii izobrazhenii, poluchennykh s pomoshch'yu radarov s sintezirovannoi aperturoi [Comparison of the Efficiency of Different Types of Wavelets in Noise Reduction of Images Obtained with Synthetic Aperture Radars]. ***Aktual'nye problemy sovremennoi nauki i proizvodstva: Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Technical Conference.*** Ryazan: RSREU; 2024: 342–349. (In Russian).
20. Wang J, Sun K, Cheng T, et al. Deep High-Resolution Representation Learning for Visual Recognition. ***IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.*** 2021;43(10): 3349–3364. DOI:10.1109/TPAMI.2020.2983686.

authors

Roman V. Larionov
P.G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia
Digital Technology and Machine Learning Department, Faculty of Physics and Technology
0000-0002-7132-135X

Vladimir V. Khryashchev
P.G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia
Digital Technology and Machine Learning Department, Faculty of Physics and Technology
Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor
0000-0003-2978-2459

Andrey L. Priorov
P.G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia
Digital Technology and Machine Learning Department, Faculty of Physics and Technology
Dr. of Sci. (Engineering), Professor
0000-0003-2984-340X

Submitted: April 2, 2026. Accepted: June 23, 2026. Published: June 30, 2026.

УДК 528.92/.94:004.9:004.031.43:614.8+912
DOI:10.30533/GiA-2026-026

CC BY

Одномоментная визуализация геоданных в реальном времени через единое программное решение без программирования

Е.Л. Кухаренко[1]

[1] Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия
ekukharenko@mail.ru

цитирование Кухаренко Е.Л. Одномоментная визуализация геоданных в реальном времени через единое программное решение без программирования // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 3. С. 55–69. DOI:10.30533/GiA-2026-026.

ключевые слова визуализация в реальном времени, геоинформационная система, мониторинг, оперативное управление, чрезвычайная ситуация

аннотация Статья продолжает тематический цикл работ, посвященных визуализации пространственных, связанных, связываемых, мультимедийных и иных данных без программирования. Рассматривается одномоментная визуализация в реальном времени самых различных данных, в том числе геоданных, в рамках одного общего приложения. Для оперативности пространство экрана следует разделить на квадранты, в каждом из которых целесообразно отображать данные по разным протоколам из различных источников и в реальном времени, из любой информационной системы, включая геоинформационные системы, любого приложения операционной системы, в том числе функционирующего в браузерах или на удаленных системах, доступ к которым осуществляется различными способами, а также видео- и аудиозвонки, встроенный или иной мессенджер и другие возможности для эффективного решения задач. Решение позволяет строить оперативные системы с высокой степенью защиты идентификационных и авторизационных данных, их автоматическим вводом, шифрованием передаваемой информации с целью более оперативного и надежного доступа к содержимому, что может найти применение в научной и народнохозяйственной деятельности. Вне рассматриваемого подхода пользователям понадобятся множество программ, повторение авторизации в них, поддержка различных протоколов через установку драйверов и, как результат, постоянные затраты времени и сил при низкой надежности, конфиденциальности и конфигурируемости. Предлагаемое единое программное решение, создающее без программирования надежную, конфиденциальную, конфигурируемую среду и позволяющее отображать пространственные и иные сопутствующие данные в реальном времени, отличается простотой применения без умаления

потребностей пользователя. Показано одно из множественных применений в виде системы реального времени для мониторинга и оперативного управления в чрезвычайных ситуациях. Обсуждаются и обосновываются иные применения предлагаемого подхода к визуализации разнообразных данных.

1 Введение

Визуализация программного обеспечения относится к интересным и давно прорабатываемым научным вопросам. Она предполагает активное использование средств виртуальной реальности, которые оперируют в том числе геопространственными данными [1]. Адаптивная визуализация геоданных позволяет упростить визуальный анализ сложных визуализаций, учесть особенности восприятия информации пользователем [2].

Интерес представляет способ визуализации геоданных, используемый при разработке веб-ориентированных геоинформационных систем (ГИС). Это комбинированный метод визуализации картографических данных, применение которого позволит построить новую архитектуру веб-ориентированной ГИС, обладающей возможностями десктопных ГИС [3].

В настоящее время необходимо разрабатывать способы функционирования средств визуализации, содержащих максимум информации. Однако перед этим следует провести анализ методов, нашедших применение в современных ГИС, определить их достоинства и недостатки для последующего обоснования выбора направлений отечественных разработок [4].

С точки зрения наглядности и комплексного восприятия данных нецелесообразно задействование визуализационных экранов больших размеров, в том числе с использованием свойств золотого сечения [5]. Такие экраны применяются в ситуационных центрах, центрах мониторинга, где одной из функций является оверлейное отображение в реальном времени разнородных данных для принятия оператором решения, где также важна оценка эффективности, имеющая большое практическое значение для совершенствования механизма управления соответствующими организационными системами [6] с возможностью произвести оценку состояния в реальном времени и прогнозировать будущие состояния [7].

Из накопленного практического опыта следует, что необходимо уделять большое внимание эргономике визуализации, интерфейсу визуализационных экранов, оценке качества программных средств[1] и эффективности информационно-телекоммуникационных систем (ИТКС) [8], поэтому требуются новые решения, варианты построения ИТКС с методологической базой количественной оценки эффективности вариантов построения, представленной пока недостаточно [9]. Необходима опора на метод среднего взвешенного, закон Парето, методы последовательных уступок, анализа иерархий, анализа среды

1 ГОСТ 28195-89. Оценка качества программных средств. Общие положения. М.: Изд-во стандартов, 1989. 30 с.;
ГОСТ ИСО/МЭК 9126-2001. Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению. Минск: ЕАСС, 2001. 10 с.;
ГОСТ-Р 56939-2016. Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2016. 19 с.;
ГОСТ-Р 58412-2019. Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Угрозы безопасности информации при разработке программного обеспечения. М.: Стандартинформ, 2016. 22 с.;
ГОСТ РВ 51987-2002. Информационная технология. Комплекс стандартов на АС. Типовые требования и показатели качества функционирования информационных систем. М.: Стандартинформ, 2003. 52 с.;
ГОСТ 70186-2022. Интернет-ресурсы и другая информация, представленная в электронно-цифровой форме. Инструменты разработки цифрового контента. Требования доступности для людей с инвалидностью и иных лиц с ограничениями жизнедеятельности. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 29 с. и др.

функционирования и др., а также на известные теоретические модели качества ИТКС: модель МакКола, включающую такие аспекты качества программного продукта, как эксплуатация, модернизация и переносимость (чтобы связать технические метрики кода, которые видят разработчики, с бизнес-требованиями пользователя, сформулированными заказчиком; именно отсюда берет корни активно применяемая сейчас концепция упрощения системы без умаления потребностей пользователя)[2]; модель Боэма, согласно которой показателем качества программного обеспечения является возможность повторного использования для достижения критерия полноты[3]; модель Гилба[4]; классификацию требований к программным системам FURPS (*англ.* Functionality, Usability, Reliability, Performance, Supportability — «функциональность, удобство использования, надежность, производительность, возможность поддержки»); IEEE 1061[5]; ISO/IEC 9126[6] (ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93[7]) и заменивший его стандарт ISO/IEC 25010:2011[8] [10]; модель Дроми с фреймворком для оценки требований на этапах проектирования и реализации и критерием повторного использования[9]; модель GQM (*англ.* Goal, Question, Metric — «цель, вопрос, метрика») и др.

Посвященные архитектурно-центрическому подходу к проектированию систем работы[10,11] [11, 12] указывают, что характеристики качества выполняют ключевую роль в построении архитектуры, которая, в свою очередь, управляет процессом функционирования ИТКС [13].

Таким образом, применение и результативное отображение пространственных и иных данных в оперативных системах, эффективно построенных и оцененных, методологически выверенных для максимизации их надежности, является актуальной задачей. Только те ИТКС, которые построены на перечисленных принципах и методологической базе, проверены по множеству параметров с улучшением эффективности, позволяют решить эту задачу.

Отслеживание техногенных и природных пожаров, аварий, чрезвычайных, ледовых и лавинных ситуаций, оперативной обстановки с метеоданными, а также потенциально опасных критически важных объектов, сил и средств постоянной готовности [14], дорожных происшествий, загрузки железнодорожных транспортных коридоров [15], траектории пути, инфраструктурного коридора [16], экологической и навигационной обстановки, прогнозирование координат местоположения судна с помощью нейронных сетей [17], мониторинг использования земель сельскохозяйственного назначения, применение геоданных в строительстве и многие другие задачи, важность которых для экономики и потребителей сложно переоценить, — все это делает особенно вотребованными системы реального времени и их формализацию [18]. Сжатие их в единое программное решение взамен множества информационных систем, тем более без программирования, является вызовом для разработчиков и удобным выходом для пользователей. Рассматриваемое решение было уже применено в перечисленных задачах и открыто для иных применений.

---

2 McCall J.A., Richards P.K., Walters G.F. Factors in Software Quality. Vol. III. Preliminary Handbook on Software Quality for an Acquisiton Manager. N. Y.: Rome Air Development Center, 1977. 42 p.

3 Боэм Б., Браун Дж., Каспар Х. и др. Характеристики качества программного обеспечения / пер. с англ. Е.К. Масловского. М.: Мир, 1981. 208 с.

4 Gilb T. Principles of Software Engineering Management. Reading: Addison Wesley, 1988. 464 p.

5 IEEE 1061-1998. IEEE Standard for a Software Quality Metrics Methodology. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://standards.ieee.org/ieee/1061/1549 (дата обращения: 19.12.2025).

6 ISO/IEC 9126:1991. Software Engineering – Product Quality. ISO/IEC JTC 1/SC 7, 1991. 13 p.

7 ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93. Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению. М.: Госстандарт России, 2004. 9 с.

8 ISO/IEC 25010:2011. Systems and Software Engineering – Systems and Software Quality Requirements and Evaluation (Square) – System and Software Quality Models. ISO/IEC JTC 1/SC 7, 2011. 34 p.

9 Dromey R.G. A Model for Software Product Quality // IEEE Transactions on Software Engineering. 1995. Vol. 21. Iss. 2. P. 146–162.

10 Мордвинов В.А. Онтология моделирования и проектирования семантических информационных систем и порталов: справ. пособие. М.: МГДДЮН, 2005. 240 с.

11 Соснин П.И. Архитектурное моделирование автоматизированных систем: учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2008. 147 с.

2 Материалы и методы

Представим метод решения задачи визуализации геоданных в системах реального времени, когда на визуализационном экране размером 20–23″ и больше (или на нескольких связанных широкоформатных мониторах[12] либо видеостене[13]) оверлейно показываются геоданные:

- на нескольких оперативных изображениях, в том числе реального времени;
- с многочисленных территориально разнесенных датчиков мониторинга обстановки на территории их функционирования и (или) датчиков контроля оборудования;
- из любого приложения операционной системы, в том числе десктопной либо иной геоинформационной или информационной системы;
- все шире используемых в промышленных решениях систем управления потоками данных [19];
- с видеокамер и из других источников, в том числе видеозвонков персонала оперативных центров, применяющих геоинформационные и разнообразные информационные системы в реальном времени.

Все это требует оперативности отображения и исключает установку какого-либо программного обеспечения для построения системы (в целях ее надежности, не говоря об информационной безопасности и защите данных от несанкционированного доступа) у пользователя, осуществляющего доступ к такой разрозненной, гетерогенной и территориально разнесенной информации. Предлагаемый авторский подход, применимый к любым данным, операционным системам, информационным продуктам и их синергии и (или) комплексу таких систем, делает возможным как эффективный доступ, так и высокую надежность (*англ.* Service Level Agreement).

На оборудовании, осуществляющем оперирование данными (например, персональном компьютере профильного специалиста, удаленном сервере или любом ином оборудовании), в центре обработки данных либо на сервере (любом ином оборудовании) в сети предприятия (организации) при необходимости устанавливается компонент (агент) предлагаемого авторского решения «Сервер», где широкий поток данных отдается, а меньший в виде команд принимается. Задача компонента «Сервер» — по максимально эффективному протоколу передать поток (потоки) данных как доступ к данным в одну или множество точек, а компонента (компонентов) предлагаемого авторского решения «Клиент» — получить доступ и отобразить данные в том виде, в каком они применяются, когда широкий поток данных принимается, а меньший в виде команд отдается. Возможно применение без компонента «Сервер», но с компонентом «Клиент», что еще больше расширяет перечень решаемых задач визуализации потоков данных с их максимальной защитой.

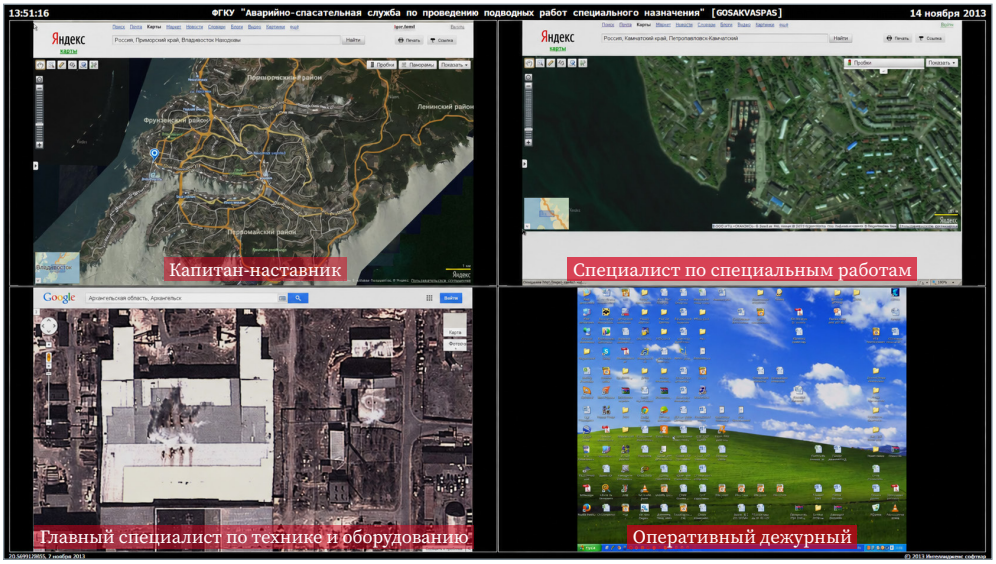
По мере подключения серверов, иных компьютеров, серверов приложений к приложению (компоненту) «Клиент» в соответствующих квадрантах (квадрант — часть экрана технического средства отображения, в контексте настоящего исследования имеющая любой размер относительно иных квадрантов и любое количество одномоментно отображаемых единиц в рамках регулярной или нерегулярной сетки экрана; каждый квадрант также содержит подквадранты) будет появляться изображение (рис. 1).

12 Используются мониторы с видеокартами AMD (AMD Eyefinity Multi-Display Technology), Matrox C900 (Matrox Mura Control Video Wall Management Software), NVidia Asus GeForce GTX 970 (NVidia Mosaic и NVIDIA RTX Desktop Manager) и др., при этом необходимы кабели HDMI или DisplayPort (микширование кабелей или видеокарт в системе делает ее неработоспособной).

13 Автору известно применение в оперативном центре видеостены размером в 22,5 кв. м (15 ячеек по 1,5 кв. м каждая) и более с исключительной надежностью и быстродействием.

Рис. 1
Внешний вид приложения «Клиент» оперативного центра мониторинга

Fig. 1
The screenshot of the Client application in the operational monitoring center



Примечание. Здесь и далее в статье приводятся иллюстрации для открытого опубликования с соблюдением режима доступа к конфиденциальной информации, информации ограниченного доступа, которая, как правило, используется в оперативных центрах мониторинга.

3 Результаты и обсуждение

Предлагаемый к рассмотрению комплекс программного обеспечения (в том числе как часть ИТКС), состоящий из двух компонентов «Сервер», «Клиент» и сопутствующих микросервисов, является достаточно сложным. В нем реализовано множество разнообразных протоколов, в частности сигнальных, для снижения объема потоков между компонентами «Клиент» и «Сервер», увеличения общей производительности комплекса, чему было уделено достаточное внимание, в частности после анализа эффективности через модели и методы оценки эффективности ИТКС.

Например, в рамках этапа промышленной эксплуатации[14] в оперативном ситуационном центре круглосуточного мониторинга одномоментный доступ осуществляется к девяти оперативным квадрантам, в каждый из которых добавлены три дополнительных, а квадрант 5 (центральный) содержит 12 единиц по количеству округов города Москвы. Ряд квадрантов отображает геоданные в реальном времени, где сложно представить потоки данных без применения специальных средств. Итого — 39 оперативных изображений различных по направленности оригинальных информационных систем[15] разных производителей и с разнообразными визуальными и звуковыми эффектами, отображаемых в рамках одного приложения на видеостене, широкоформатном мониторе оператора и полной копией на любом удаленном мониторе и (или) видеостене, в том числе в иной точке подключения к локальной сети, включая оперативный

14 ГОСТ 34.201-2020. Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Виды, комплектность и обозначение документов при создании автоматизированных систем. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 9 с.;
ГОСТ Р 59792-2021. Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Виды испытаний автоматизированных систем. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 6 с.;
ГОСТ Р 59795-2021. Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Требования к содержанию документов. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 26 с.

15 Дементьев И.О., Ильин И.В., Мордвинов В.А. Классификатор информационных систем; Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет). М., 2008. 45 с. Деп. в ВИНИТИ РАН 29.05.2008 № 467-В2008.

кабельный и (или) спутниковый канал при доступе из оперативного автомобиля (автобуса оперативного штаба).

Полная копия функционирует также с флеш-накопителя, на котором приняты меры как по защите авторизационных данных, так и по минимизации электромагнитного излучения [20] методом экранирования [21]. Это необходимо для исключения ситуации, когда в оперативном штабе поврежден носитель (компьютер, кластер) и доступ к оперативным системам осуществляется не из центра, а с полной портативной копии, что показывает эффективность предлагаемого решения.

В ином случае пришлось бы использовать 39 отдельных оригинальных, функциональных и поэтому потребляющих много ресурсов приложений в одной операционной системе оператора центра мониторинга. При доступе к таким программам необходимо многократно авторизовываться, в том числе с аппаратным ключом (смарт-картой), а при аварийном завершении одной из них — пытаться запустить ее заново и вводить идентификационные или начальные сведения (о зоне интереса, параметрах визуализации, иных настройках), что нефункционально и фактически невозможно при оперативной работе. Кроме того, при построении геоизображения в ГИС и иных системах требуется учитывать когнитивные особенности восприятия визуальной оперативной информации пользователем и свойства отображения пространственных данных [22]. В перечне задач операционной системы было бы как минимум 39 приложений, конфликтующих за ресурсы программно-аппаратного комплекса (ПАК), самостоятельно перехватывающих оперативный фокус без создания протоколируемой и контролируемой очереди для принятия решений и реагирования на события внутри них, что также неприемлемо в оперативной работе. Авторское приложение содержит все эти программы внутри с решением всех оперативных задач, с записью истории событий для дальнейшего усовершенствования процессов управления в оперативном центре, а также улучшения надежности ПАК в целом. При виртуализации ПАК и компонентов его запуск возможен с портативного носителя, что делает функциональность максимально надежной при оперативной работе в рамках операционного центра и его филиалов (удаленных точек доступа).

Более того, одномоментное выполнение как минимум 39 конкурирующих приложений в рамках одной операционной системы при определенных условиях может приводить к отказам, что неприемлемо даже с учетом применения операционной системы реального времени и радикально усложняет ПАК оператора, требуя решения задач по интеграции разнородных частей прикладного программного обеспечения, функционирования с приоритетом выше ядра операционной системы [23] и других маневров.

Очевидно, что без единого программного решения выполнение оператором ситуационного центра должностных обязанностей затруднительно. Наличие же копии в иной территориально удаленной точке вообще невозможно как из-за ограничений оригинальной информационной системы, не допускающей второго подключения к экземпляру ведомой или унаследованной (*англ.* legacy) информационной системы, исключающей клонирование пользователя, так и из-за отсутствия у операторов уверенности в том, что оба смотрят на одни и те же оперативные сведения. Принимаемые операторами решения часто определяют выделение оперативных сил и средств для реагирования. При этом из-за того, что оперативный дежурный ситуационного центра и его коллега имеют несинхронизированные сведения и занимаются уточнением и согласованием, возможны ошибки и задержки. Вследствие же большого объема и разнородности метаданных, а также разнообразия решаемых с помощью ГИС задач существующие методы подготовки принятия решения с использованием ГИС имеют значительные ограничения [24].

Для настройки предлагаемого авторского решения применяется интерактивное и адаптивное конфигурирование непосредственно из приложений «Клиент» и «Сервер» или человекочитаемый файл конфигурации формата XML для сетевого (системного) администратора, системного инженера или филд-инженера. В файле указано, в каком квадранте отображать:

- рабочий стол (окно) любой удаленной операционной системы (RDP, VNC, SSH и др.);
- окно визуализации геоданных (послойное отображение указанных в легенде источников);
- окно любого имеющегося в наличии локального или встроенного в агрегирующее приложение веб-браузера (используются все протоколы, поддерживаемые веб-браузером);
- окно любого приложения текущей операционной системы (множество протоколов операционной системы);
- окно источника видеосигнала — видеокамеры, видеофайла, изображения абонента при видеозвонке и т. д. (множество форматов передачи видеопотоков);
- текстовое сообщение для вывода служебной информации пользователю, например при отсутствии подключения к удаленной системе, плановых (аварийных) работах и пр., в том числе чат, встроенный мессенджер.

Пользователь компонента «Клиент» имеет такие функциональные возможности, как:

- выбор квадранта — через сенсорный экран, или мышкой, или горячей клавишей программируемой клавиатуры;
- увеличение квадранта до 85 % (с мультипликационным эффектом или без него) — однократное нажатие мышкой или через сенсорный экран на квадрант либо номер квадранта на программируемой клавиатуре;
- увеличение квадранта до 100 % (с мультипликационным эффектом или без него) — двукратное нажатие мышкой или через сенсорный экран на квадрант либо на номер квадранта на клавиатуре;
- сжатие квадранта до первоначального размера (с мультипликационным эффектом или без него) — нажатие мышкой или через сенсорный экран на промежуток между квадрантами.

Отметим также ряд особенностей.

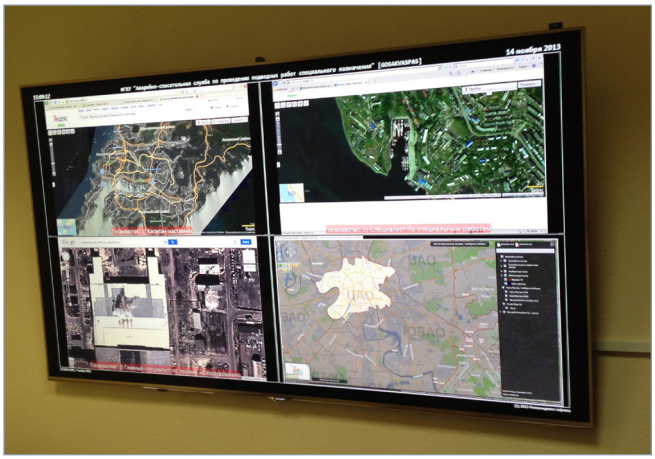
1. Звуковые эффекты разных систем микшируются, т. е. нет приоритета у звукового сопровождения какого-либо квадранта. Каждый квадрант в любой момент времени может отозваться звуковым сигналом. При этом выделяется квадрант, выдающий звуковое сопровождение, для его быстрого определения, а при коллизиях отображается их очередь с указанием штампа времени. Оператор после идентификации квадранта (его части) обязан увеличить изображение, принять решение и снять источник звука, если он периодический.
2. Элемент громкости, в том числе кнопка выключения звука и кнопка распахивания квадранта (панель громкости), реализован для каждого квадранта (его части) и отображается при наведении мышкой на квадрант, а также при выборе квадранта через сенсорный экран. Нажатие на «Распахнуть» отобразит 100 %. Нажатие на ESC вернет квадрант до его первоначальных размеров, если размер был 85 %. После отображения квадранта на 100 % панель громкости автоматически скрывается, что было протестировано при оперативной работе и уточнено параметрами.
3. Знак «Звук выключен» в квадранте отображается всегда, если звук выключен в каждом квадранте, для которого это было активизировано в отчетливом виде.
4. После отображения квадранта на 100 % мышь и клавиатура переходят на него как на полноценный удаленный рабочий стол без каких-либо ограничений и др.

Таким образом, рассматриваемое приложение «Клиент» отображает полиэкран (например, 2×2, 3×3, 4×4, 6×3 и т. д.), в каждом квадранте которого может быть:

- экран любой информационной системы, функционирующей в любой операционной системе, в том числе удаленной;
- страница (страницы при применении закладок) с любым интернет-адресом;
- надпись в виде сообщения пользователю, например маркировка квадранта (подквадранта), о регламентных работах, отсутствии подключения и пр.;

Рис. 2
Пример применения авторского приложения в реальной обстановке оперативного центра мониторинга

Fig. 2
The current view of the Client application in the operational monitoring center



— изображение и звук (например, со встроенного ТВ-тюнера компьютера при его наличии или иного аппаратного источника);
— изображение и звук из любого источника (аналоговой видеокамеры, IP-камеры, видеосервера, MP3-плеера или аналогичного источника аудио- и видеосигнала) и другие элементы.

Для расширения спектра взаимодействия с приложением используются возможности сенсорного монитора у оператора, плазменной панели в зале совещаний оперативного штаба (рис. 2) и другие устройства вывода, а для управления — клавиатуры, например Genius SlimStar 335, WolfKing Timberfolf или SteelSeries Merc Stealth, с дополнительным блоком цифровых клавиш 1–10 слева для эффективизации оперативной работы. Тогда будут применены, например, кнопки:
— 1–9 — вызов квадрантов 1–9 (для большего количества используется ввод через * или 0);
— 10, 12 — перемотка соответственно вперед и назад по окнам, развернутым на 90 %;
— 11 — выключение или включение звука;
— 13, 15 — перемотка соответственно вперед и назад по окнам, развернутым на 100 %;
— 14 — отображение всех квадрантов немедленно.

В одном квадранте администратором (пользователем), как было показано ранее, может быть назначено несколько подключений. При этом в квадранте будут созданы вкладки. Для перехода между вкладками необходимо выбрать соответствующее наименование, что создает предпосылки для микширования в рамках одного квадранта источников, отображаемых в реальном времени информационных систем, что актуально для одномоментной визуализации геоданных в реальном времени.

Представленное авторское программное обеспечение позволяет отказаться от программирования для получения множественного одномоментного доступа к разнообразным данным, в том числе пространственным, в реальном времени через единое программное решение, а не через множество приложений, часто конфликтующих между собой при установке на одном ПАК. Перспективы разработки связаны с уточнением технических требований к рассматриваемому комплексу, чтобы можно было еще более эффективно решать задачи одномоментной визуализации данных в реальном времени.

Для иллюстрации метода ниже приведены параметры приложения.

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
<Configuration>…
<NoLicenseKeyText><Message>Ключ аппаратной защиты не содержит разрешения
для %featurename%.\nОбратитесь к поставщику для замены ключа аппаратной
защиты...</Message>
<Foreground>White</Foreground><Size>24</Size><VerticalAlignment>Center</
VerticalAlignment>
<HorizontalAlignment>Center</HorizontalAlignment></NoLicenseKeyText>
<!--  -->
<Rows>2</Rows><Columns>2</Columns><Name>Стена ГОСАКВАСПАС</Name>
<Title><Text>ФГКУ "Аварийно-спасательная служба по проведению подводных
работ специального назначения" [%netbiosname%]</Text><Font>Consolas
</Font><FontSize>18</FontSize><FontWeight>Bold</FontWeight><Verti
calAlignment>Top</VerticalAlignment><HorizontalAlignment>Center</
HorizontalAlignment></Title><Time><Enable>true</Enable><Format>HH:mm:ss</
Format><Font>Consolas</Font><FontSize>18</FontSize><FontWeight>Bold</
FontWeight><VerticalAlignment>Top</VerticalAlignment><Horizontal
Alignment>Left</HorizontalAlignment></Time><Date><Enable>true</
Enable><Format>dMMMMyyyy</Format><Font>Consolas</Font><FontSize>18</
FontSize><FontWeight>Bold</FontWeight><VerticalAlignment>Top</Verti
```

```
calAlignment><HorizontalAlignment>Right</HorizontalAlignment></Date>
<BackgroundColor>#000000</BackgroundColor><ForegroundColor>#FFFFFF</Foreg
roundColor><ForegroundGlowColor>#000000</ForegroundGlowColor>
<!--1-->
<Displays><VideoPC><Index>1</Index><Ip>192.168.0.106</Ip><Port>48148</
Port><IndexPC>1</IndexPC><Title>Капитан-наставник, %date% %time%</
Title><Screengrabber><Enable>false</Enable><Timeout>600</Timeout>
<Destinations><Destination keepfiles="144">D:\StenaGAS\192-168-0-
106\%dd%.%MM%.%yyyy%_%HH%-%mm%, %ddd%.png</Destination></Destinations></
Screengrabber><Caption><Text>Капитан-наставник</Text><FontSize>42</
FontSize><Foreground>#FFFFFFFF</Foreground><Background>#55FF0000</
Background><CornerRadius>15</CornerRadius><VerticalAlignment>Bottom</
VerticalAlignment><HorizontalAlignment>Center</HorizontalAlignment></
Caption></VideoPC>
<!--2-->
<VideoPC><Index>2</Index><Ip>192.168.0.219</Ip><Port>48148</
Port><IndexPC>1</IndexPC><Title>Специалист по специальным работам, %date%
%time%</Title><Screengrabber><Enable>false</Enable><Timeout>600</Time
out><Destinations><Destination keepfiles="144">D:\StenaGAS\192-168-0-
219\%dd%.%MM%.%yyyy%_%HH%-%mm%, %ddd%.png</Destination></Destinations></
Screengrabber><Caption><Text>Специалист по специальным работам</
Text><FontSize>42</FontSize><Foreground>#FFFFFFFF</Foreground><Back
ground>#55FF0000</Background><CornerRadius>15</CornerRadius><Vertic
alAlignment>Bottom</VerticalAlignment><HorizontalAlignment>Center</
HorizontalAlignment></Caption></VideoPC>
<!--3-->
<VideoPC><Index>3</Index><Ip>192.168.0.32</Ip><Port>48148</
Port><IndexPC>1</IndexPC><Title>Главный специалист
по технике и оборудованию, %date% %time%</Title><Screengra
bber><Enable>false</Enable><Timeout>600</Timeout><Destina
tions><Destination keepfiles="144">D:\StenaGAS\192-168-0-
32\%dd%.%MM%.%yyyy%_%HH%-%mm%, %ddd%.png</Destination></Destinations></
Screengrabber><Caption><Text>Главный специалист по технике
и оборудованию</Text><FontSize>42</FontSize><Foreground>#FFFFFFFF</Foregr
ound><Background>#55FF0000</Background><CornerRadius>15</CornerRadius><V
erticalAlignment>Bottom</VerticalAlignment><HorizontalAlignment>Center</
HorizontalAlignment></Caption></VideoPC>
<!--4-->
<VideoPC><Index>4</Index><Ip>192.168.0.101</Ip><Port>48148</
Port><IndexPC>1</IndexPC><Title>Оперативный дежурный, %date% %time%</
Title><Screengrabber><Enable>false</Enable><Timeout>600</Timeout>
<Destinations><Destination keepfiles="144">D:\StenaGAS\192-168-0-
101\%dd%.%MM%.%yyyy%_%HH%-%mm%, %ddd%.png</Destination></Destinations></
Screengrabber><Caption><Text>Оперативный дежурный</Text><FontSize>42</
FontSize><Foreground>#FFFFFFFF</Foreground><Background>#55FF0000</
Background><CornerRadius>15</CornerRadius><VerticalAlignment>Bottom</
VerticalAlignment><HorizontalAlignment>Center</HorizontalAlignment></
Caption></VideoPC></Displays></Configuration>
```


4 Выводы

Работа обобщает двадцатипятилетние исследования автора, многочисленные опыты и апробацию их результатов. Разработки были успешно применены в коммерческих проектах и при выполнении государственных заказов под руководством автора, предложившего гипотезу, сформулировавшего теорию, обосновавшего методологию и практический подход, который затем был проверен в программной реализации комплекса приложений визуализации данных в реальном времени, применяемого без программирования профессиональными и непрофессиональными пользователями.

Перечислим часть других задач, в которых представленный комплекс также эффективно использовался как единое программное решение.

1. **Системное администрирование.** Один системный администратор может получить доступ к нескольким аппаратным средствам, например UEFI, BIOS, IPMI, KVM, коммутаторам по различным протоколам из-за их различий у разных производителей, аппаратным или виртуальным серверам по любым протоколам в режиме реального времени на одном мониторе, экране, полиэкране. Инструмент применим в центрах обработки данных с собственной аппаратной инфраструктурой в офисе или удаленно.
2. **Центр исследований и разработки программного обеспечения.** Эффективная коммуникация является ключевым фактором для надежной работы успешной и гибкой команды. Автор разработал концепцию, прототип и пример внедрения рассматриваемого инструмента, не только сочетающего преимущества онлайн-коммуникации внутри команды, но и предоставляющего новые концепции и функции, помогающие совместной работе и общению в командах разработки программного обеспечения в режиме реального времени. Например, руководители групп могут помогать разработчикам на одном экране и улучшать исходный код в режиме реального времени, чтобы избежать принятия неправильных решений. Любой член команды может обратиться за помощью к руководителю группы и получить помощь в то же время, с той же средой и отладочными данными даже при наличии нескольких мониторов и запущенных систем отладки в рамках гибкого интерфейса предлагаемого инструмента. При этом руководитель команды понимает, что делает его сотрудник в настоящий момент, и при необходимости немедленно вмешивается, когда в иных системах командной работы это часто невозможно. Инструмент подключается к любой операционной системе и любому программному обеспечению, поэтому пользователи работают в своей стандартной среде и не совершают лишних действий. Если руководитель запустил компонент «Клиент» заново, все доступы к его команде будут восстановлены, или (если целевое программное обеспечение недоступно) компонент «Клиент» будет подключаться до успешного соединения, или параметры инструмента будут интерактивно изменены с помощью мастера пользователем либо удаленным администратором. Это позволяет эффективнее использовать защищенную инфраструктуру и программное обеспечение различных производителей с внедрением эффективных процессов команды разработчиков программного обеспечения, обеспечения качества, создания документации, развертывания программного обеспечения, поддержки и т. д.
3. **Мониторинг.** Дежурный оператор, пользователь, сотрудник службы безопасности может получить доступ к персональным компьютерам пользователей, специальным информационным системам на одном экране в режиме реального времени, где возможно большее количество подключений, чем в рассматриваемом примере.
4. **Безопасность.** Оперативный дежурный, его начальник, сотрудник технической службы может осуществлять мониторинг видеопотоков с множества видеокамер, информационных систем с видеоархивами, поиск субъектов в режиме реального времени.
5. **Доставка контента.** Оператор рекламного контента контролирует отображаемый контент на множестве экранов в режиме реального времени. В этой конфигурации компоненты «Клиент» и «Сервер» частично противоположны друг другу, но в целом концепция сохраняется.
6. **Обучение.** Ментор и менти, географически разнесенные, имеют доступ к одной точке так долго, как необходимо, оперируют одним кодом, презентацией, приложениями и прочим, размещенными на оборудовании обоих, сведения не перемещаются с их оборудования, небезопасные и недружественные платные или бесплатные (лимитированные) технологии при этом не используются. Способ эффективен для парного программирования, оркестровой разработки внутри периметра, любой демонстрации экрана лектора его слушателям и т. д., что сложно переоценить.

Таким образом, предложенное программное решение целесообразно применять при построении любой системы реального времени, в том числе отображении геопространственных данных и знаний [25] с адаптивным редактором [26], что является текущей задачей автора, а также для тестирования в иных ситуациях применения и с использованием активно применяемых в настоящее время форматов — высокоэффективного формата графических файлов (*англ.* High Efficiency Image File Format, HEIF), высокоэффективного кодирования видеоизображений (*англ.* High Efficiency Video Coding, HEVC) и др.

библиография

1. Авербух В.Л., Авербух Н.В., Васёв П.А. и др. Визуализация программного обеспечения на базе средств виртуальной реальности геопространственных данных. Обзор и перспективы разработки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 1. С. 195–210. DOI:10.18799/24131830/2020/1/2461.
2. Вицентий А.В. Адаптивная визуализация геоданных в социальных медиа // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8, № 4. С. 1–15. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://naukovedenie.ru/PDF/57TVN416.pdf (дата обращения: 19.12.2025).
3. Милихин М.М., Гриценко Ю.Б., Рычагов М.М. Комбинированный метод визуализации картографических данных веб-ориентированной геоинформационной системы // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2015. № 1 (35). С. 112–115.
4. Воронин А.В. Анализ методов и способов функционирования геоинформационных систем // Информация и космос. 2018. № 3. С. 124–131.
5. Воронин А.В. Дополненная реальность при визуализации данных с использованием свойств «золотого» сечения // Труды Института системного программирования РАН. 2020. Т. 32, № 1. С. 109–120. DOI:10.15514/ISPRAS-2020-32(1)-6.
6. Воронин А.В., Зацаринный А.А., Ионенков Ю.С. Особенности оценки эффективности геоинформационной системы как элемента ситуационного центра // Системы и средства информатики. 2018. Т. 28, № 2. С. 75–87. DOI:10.14357/08696527180206.
7. Гришко А.К., Лысенко А.В., Моисеев С.А. Прогнозирование и оптимизация управления процессов проектирования сложных технических систем в масштабе реального времени // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 1 (21). С. 40–45. DOI:10.21685/2307-4205-2018-1-5.
8. Зацаринный А.А., Ионенков Ю.С. Оценка эффективности информационно-телекоммуникационных систем / под ред. А.А. Зацаринного. М.: НИПКЦ Восход-А, 2020. 120 с. DOI:10.30826/93055-467-0.
9. Зацаринный А.А., Ионенков Ю.С. Метод выбора варианта построения информационно-телекоммуникационной системы // Системы и средства информатики. 2019. Т. 29, № 3. С. 114–126. DOI:10.14357/08696527190310.
10. Бураков Д.П., Кожомбердиева Г.И. Использование формулы Байеса при оценивании качества программного обеспечения по стандарту ISO/IEC 9126 // Программные продукты и системы. 2019. № 1. С. 34–41. DOI:10.15827/0236-235X.125.034-041.
11. Golenkov V.V. Ontology-based Design of Intelligent Systems // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. 2017. № 7. С. 37–56.
12. Ермаков С.Р., Мордвинов В.А., Рачков А.В. Методы виртуализирования в мультимедиа информационных системах на примере цифрового двойника // International Research Journal. 2020. № 12 (102). С. 29–32. DOI:10.23670/IRJ.2020.102.12.005.
13. Щенников А.Н. Качество информационных систем // ИТНОУ: информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2018. № 1 (5). С. 53–62.
14. Рыженко Н.Ю. Использование геоинформационных систем в структурах МЧС России // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2016. № 1 (7). С. 480–484.

15. Розенберг И.Н., Дулин С.К. О некоторых аспектах железнодорожной геоинформатики (обзор) // Труды АО «НИИАС»: сборник статей. М.: Т8 Издательские Технологии, 2021. Вып. 11. Т. 2. С. 83–127.
16. Петров С.А., Урбанова Ч.Б. Геоинформационное моделирование объектов железнодорожной инфраструктуры // Вестник Бурятского государственного университета. Биология, география. 2023. № 2. С. 29–40. DOI:10.18101/2587-7143-2023-2-29-40.
17. Сазонов А.Е., Дерябин В.В. Прогнозирование траектории движения судна при помощи нейронной сети // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2013. № 3 (22). С. 6–13.
18. Зеленский А.А., Грибков А.А. Основы формальной теории систем реального времени // Информационно-управляющие системы. 2025. № 5. С. 2–10. DOI:10.31799/1684-8853-2025-5-2-10.
19. Матерухин А.В. Проблематика создания ГИС на основе систем управления потоками данных // Геодезия и картография. 2017. Т. 78, № 4. С. 44–47. DOI:10.22389/0016-7126-2017-922-4-44-47.
20. Хлопов Б.В., Самойлович М.И., Шпак А.В. и др. Воздействие на флеш носитель информации электромагнитным полем, сформированным метаматериалом на основе опаловой матрицы // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9, № 11. С. 12–18.
21. Паршин Д.А., Яресько А.П., Остапенко Н.А. Защита USB-flash-носителей от утечек информации по каналу побочных электромагнитных излучений // Безопасность информационного пространства — 2017. XVI Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых: сборник статей. Екатеринбург: УрФУ, 2018. С. 113–116.
22. Антонов Е.С. Геокогнитивные карты и технологии — новый этап в картографии // Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25, № 2. С. 140–150. DOI:10.33764/2411-1759-2020-25-2-140-150.
23. Домарацкий Я.А. Интеграция программного обеспечения реального времени и операционных систем общего назначения // Программные продукты и системы. 2005. № 1. С. 28–31.
24. Воронин А.В. Модификация метода разложения на части подготовки принятия решения в ситуационном центре с использованием классификации пространственных объектов в ГИС // Информация и космос. 2019. № 2. С. 99–105.
25. Янкелевич С.С., Кухаренко Е.Л. Методологическое обоснование содержания, структуры и программной реализации базы геопространственных знаний территориальных образований // Геодезия и картография. 2024. Т. 85, № 9. С. 33–45. DOI:10.22389/0016-7126-2024-1011-9-33-45.
26. Грибова В.В., Паршкова С.В., Федорищев Л.А. Онтологии для разработки и генерации адаптивных пользовательских интерфейсов редакторов баз знаний // Онтология проектирования. 2022. Т. 12, № 2 (44). С. 200–217. DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-2-200-217.

автор **Кухаренко Евгений Леонидович**
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ), Новосибирск, Россия
Научно-исследовательский институт стратегического развития
канд. техн. наук
0009-0007-9263-8202

Поступила 24.12.2025. Принята к публикации 23.06.2026. Опубликована 30.06.2026.

UDC 528.9
DOI:10.30533/GiA-2026-026

CC BY

About Visualizing Various Data in Real Time Through One Software Application without Programming

Evgeniy L. Kukharenko[1]

[1] Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
ekukharenko@mail.ru

citation Kukharenko EL. About Visualizing Various Data in Real Time Through One Software Application without Programming. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying.* 2026;70(3): 55–69. DOI:10.30533/GiA-2026-026.

keywords real-time data visualization, geoinformation system, monitoring, operational management, emergency

abstract The article continues the thematic cycle of works devoted to visualization of spatial data, linked data, linked data, multimedia data and others without programming. It considers one-step visualization of various data, including real-time geodata within one common application without programming. Long-term experience of the author shows that for efficiency the screen space should be divided into quadrants, in each of which it is reasonable to display different data on different protocols from different sources in real time, from any information system, including video calls, built-in or other messenger, any application of the operating system, including geoinformation system, as well as functioning in browsers or on remote systems, accessed through different protocols. The solution allows building one-step systems for application in various scientific, national and economic tasks with a high degree of protection of identification and authorization data, encryption of transmitted data for less-time access to the content. Outside of the author's solution, users will need to have the same multiple programs from different vendors, repetition of authorization in them, support for different protocols through the installation lot of different drivers and applications and as a result, constant expenditure of time and effort with low reliability, confidentiality and configurability of such solutions. A single software solution that displays geodata in real time, created without programming, is difficult to overestimate, but easy to use and deal with without stress.

references

1. Averbukh VL, Averbukh NV, Vasev PA, et al. Vizualizatsiya programmnogo obespecheniya na baze sredstv virtual'noi real'nosti geoprostranstvennykh dannykh. Obzor i perspektivy razrabotki [Software Visualization of Geospatial Data Based on Virtual Reality Systems. Survey and Future Developments]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering.* 2020;331(1): 195–210. (In Russian). DOI:10.18799/24131830/2020/1/2461.

2. Vicentiy AV. Adaptivnaya vizualizatsiya geodannykh v sotsial'nykh media [Application of Adaptive Geovisualization in Geosocial Media]. ***Online Journal "Naukovedenie".*** 2016;8(4): 1–15. (In Russian). Available from: http://naukovedenie.ru/PDF/57TVN416.pdf (Accessed 19 December 2025).
3. Milikhin MM, Gritsenko YuB, Rychagov MM. Kombinirovannyi metod vizualizatsii kartograficheskikh dannykh veb-orientirovannoi geoinformatsionnoi sistemy [Combined Geospatial Data Visualization Method for Web-Based Geographic Information System]. ***Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki.*** 2015;35(1): 112–115. (In Russian).
4. Voronin AV. Analiz metodov i sposobov funktsionirovaniya geoinformatsionnykh sistem [Analysis of Methods and Technologies of Geoinformation Systems]. ***Information and Space.*** 2018;3: 124–131. (In Russian).
5. Voronin AV. Dopolnennaya real'nost' pri vizualizatsii dannykh s ispol'zovaniem svoistv "zolotogo" secheniya [Augmented Reality when Visualizing Data Using "Golden" Section Properties]. ***Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS.*** 2020;32(1): 109–120. (In Russian). DOI:10.15514/ISPRAS-2020-32(1)-6.
6. Voronin AV, Zatsarinny AA, Ionenkov YS. Osobennosti otsenki effektivnosti geoinformatsionnoi sistemy kak elementa situatsionnogo tsentra [The Features of Efficiency Evaluation of a Geoinformation System as Element of a Situational Center]. ***Systems and Means of Informatics.*** 2018;28(2): 75–87. (In Russian). DOI:10.14357/08696527180206.
7. Grishko AK, Lysenko AV, Moiseev SA. Prognozirovanie i optimizatsiya upravleniya protsessov proektirovaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem v masshtabe real'nogo vremeni [Prediction and Optimization of Processes of Design Management of Complex Technical Systems in Real Time]. ***Reliability and Quality of Complex Systems.*** 2018;21(1): 40–45. DOI:10.21685/2307-4205-2018-1-5.
8. Zatsarinny AA, Ionenkov YuS. ***Otsenka effektivnosti informatsionno-telekommunikatsionnykh sistem*** [Evaluation of the Effectiveness of Information and Telecommunication Systems] [monograph]. Moscow: NIPKC Voskhod-A; 2020. 120 p. (In Russian). DOI:10.30826/93055-467-0.
9. Zatsarinny AA, Ionenkov YuS. Metod vybora varianta postroeniya informatsionno-telekommunikatsionnoi sistemy [The Method of Selecting a Variant of the Construction of Information and Telecommunication Systems]. ***Systems and Means of Informatics.*** 2019;29(3): 114–126. (In Russian). DOI:10.14357/08696527190310.
10. Burakov DP, Kozhomberdieva GI. Ispol'zovanie formuly Baiesa pri otsenivanii kachestva programmnogo obespecheniya po standartu ISO/IEC 9126 [Using the Bayes' Theorem within Software Quality Evaluation According to ISO/IEC 9126 Standard]. ***Software & Systems.*** 2019;1: 34–41. (In Russian). DOI:10.15827/0236-235X.125.034-041.
11. Golenkov VV. Ontology-Based Design of Intelligent Systems. ***Open Semantic Technologies for Intelligent Systems.*** 2017;7: 37–56.
12. Ermakov SR, Mordvinov VA, Rachkov AV. Metody virtualizirovaniya v mul'timedia informatsionnykh sistemakh na primere tsifrovogo dvoinika [Methods of Virtualization in Multimedia Information Systems via Digital Alter-Ego]. ***International Research Journal.*** 2020;102(12): 29–32. (In Russian). DOI:10.23670/IRJ.2020.102.12.005.
13. Shchennikov AN. Kachestvo informatsionnykh sistem [Quality of Information Systems]. ***ITNOU: Informacionnye Tehnologii v Nauke, Obrazovanii i Upravlenii.*** 2018;5(1): 53–62. (In Russian).
14. Ryzhenko NYu. Ispol'zovanie geoinformatsionnykh sistem v strukturakh MCHS Rossii [The Use of Geoinformation Systems in the Structures of the EMERCOM of Russia]. ***Modern Technologies for Ensuring Civil Defense and Eliminating the Consequences of Emergency Situations.*** 2016;7(1): 480–484. (In Russian).
15. Rozenberg IN, Dulin SK. O nekotorykh aspektakh zheleznodorozhnoi geoinformatiki (obzor) [On Some Aspects of Railway Geoinformatics (Overview)]. ***Proceedings of JSC NIIAS.*** Moscow: T8 Publishing Technologies; 2021;11(2): 83–127. (In Russian).
16. Petrov SA, Urbanova ChB. Geoinformatsionnoe modelirovanie ob"ektov zheleznodorozhnoi infrastruktury [Geoinformation Modeling of Railway Infrastructure Objects]. ***BSU Bulletin. Biology, Geography.*** 2023;2: 29–40. (In Russian). DOI:10.18101/2587-7143-2023-2-29-40.

17. Sazonov AE, Deryabin VV. Prognozirovanie traektorii dvizheniya sudna pri pomoshchi neironnoi seti [Forecasting to Paths of the Motion Ship with the Help of Neural Network]. ***Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova.*** 2013;22(3): 6–13. (In Russian).
18. Zelenskii AA, Gribkov AA. Osnovy formal'noi teorii sistem real'nogo vremeni [Fundamentals of the Formal Theory of Real-Time Systems]. ***Information and Control Systems.*** 2025;5: 2–10. (In Russian). DOI:10.31799/1684-8853-2025-5-2-10.
19. Materukhin AV. Problematika sozdaniya GIS na osnove sistem upravleniya potokami dannykh [Problems of Creating GIS Based on Data Flow Control Systems]. ***Geodesy and Cartography.*** 2017;78(4): 44–47. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2017-922-4-44-47.
20. Hlopov BV, Samoylovich MI, Shpak AV, et al. Vozdeistvie na flesh nositel' informatsii elektromagnitnym polem, sformirovannym metamaterialom na osnove opalovoi matritsy [Impact on the Flash Media by an Electromagnetic Field Generated by Metamaterial Based on Opal Matrix]. ***T-Comm.*** 2015;9(11): 12–18. (In Russian).
21. Parshin DA, Yaresko AP, Ostapenko NA. Zashchita USB-flash-nositelei ot utechek informatsii po kanalu pobochnykh elektromagnitnykh izluchenii [Protection of USB Flash Drives against Information Leakage via Side Channel Electromagnetic Emissions]. ***Information Space Security 2017: All-Russian scientific and practical conference of students, postgraduates, young scientists.*** Yekaterinburg: UrFU; 2018: 113–116. (In Russian).
22. Antonov ES. Geokognitivnye karty i tekhnologii — novyi etap v kartografii [Geocognitive Cards and Technologies – A New Phase in Cartography]. ***Vestnik SSUGT.*** 2020;25(2): 140–150. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2020-25-2-140-150.
23. Domaraczkij YaA. Integratsiya programmnogo obespecheniya real'nogo vremeni i operatsionnykh sistem obshchego naznacheniya [Integration of Real Time Software and General Purpose Operating Systems]. ***Software & Systems.*** 2005;1: 28–31. (In Russian).
24. Voronin AV. Modifikatsiya metoda razlozheniya na chasti podgotovki prinyatiya resheniya v situatsionnom tsentre s ispol'zovaniem klassifikatsii prostranstvennykh ob"ektov v GIS [Modification of the Method of Decom Posing into the Decision-Making Preparation Parts in the Situation Center, Using a Classification of the GIS Spatial Objects]. ***Information and Space.*** 2019;2: 99–105. (In Russian).
25. Yankelevich SS, Kukharenko EL. Metodologicheskoe obosnovanie soderzhaniya, struktury i programmnoi realizatsii bazy geoprostranstvennykh znanii territorial'nykh obrazovanii [Substantiation of the Content, Structure and Software Implementation of the Spatial Knowledge Base of Territorial Formations]. ***Geodesy and Cartography.*** 2024;85(9): 33–45. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2024-1011-9-33-45.
26. Gribova VV, Parshkova SV, Fedorishchev LA. Ontologii dlya razrabotki i generatsii adaptivnykh pol'zovatel'skikh interfeisov redaktorov baz znanii [Ontologies for Developing and Generating Adaptive User Interfaces of Knowledge Base Editors]. ***Ontology of Designing.*** 2022;12(2): 200–217. (In Russian). DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-2-200-217.

author **Evgeniy L. Kukharenko**
Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
Research Institute for Strategic Development
PhD in Engineering
0009-0007-9263-8202

Submitted: December 24, 2025. Accepted: June 23, 2026. Published: June 30, 2026.

УДК 004.9:528.9:658.8:004.8
DOI:10.30533/GiA-2026-027

CC BY

Формирование экосистемы геоаналитики: вызовы и решения в развитии геомаркетинга

Ю.В. Родионова[1] ✉, **А.М. Тарарин**[1]

[1] Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия
✉ rodionova.moscow@yandex.ru

цитирование Родионова Ю.В., Тарарин А.М. Формирование экосистемы геоаналитики: вызовы и решения в развитии геомаркетинга // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 3. С. 70–83. DOI:10.30533/GiA-2026-027.

ключевые слова геоаналитика, геомаркетинг, геоинформационная система, искусственный интеллект, открытое программное обеспечение, государственный сервис

аннотация Статья посвящена исследованию актуальных аспектов развития экосистемы прикладной геоаналитики с акцентом на формировании перспективных направлений преодоления существующих в развитии геомаркетинга ограничений. Представлены результаты глубокого анализа популярных инструментов геомаркетинга коммерческого и некоммерческого сектора, используемых в них ключевых технологий искусственного интеллекта (*англ.* Artificial Intelligence, AI), методов обработки данных, специфики доступа к качественным геопространственным данным и обеспечения защиты персональных данных. Описаны основные проблемы, возникающие при проведении научных исследований и выполнении экспертно-аналитических работ в сфере геомаркетинга: при применении коммерческих программных решений и отдельно — при использовании инструментов, предоставляемых по лицензионной модели открытого программного обеспечения. Сформированы и описаны следующие пути преодоления ограничений и барьеров в развитии бесплатных (опенсорсных) геоинформационных систем: разработка интерфейсов минимального программного кодирования (*англ.* low-code), развитие облачных процессинговых сервисов и AI-интерфейсов, интеграция автоматического машинного обучения, формирование библиотек предобученных моделей, защита и стандартизация данных. Отдельное внимание уделено вопросам развития российского сегмента геомаркетинга, предложены перспективные меры поддержки его развития на национальном уровне, показана целесообразность реализации ответственного национального подхода, при котором государственные сервисы предоставляют качественную опорную информацию, необходимую для реализации геомаркетинговых исследований. Результаты работы вносят вклад в развитие экосистемы прикладной геоаналитики, ориентированной на доступность

широкому кругу пользователей: без дорогостоящих лицензий, технических барьеров и с обширными возможностями для реализации различных перспективных разработок профессионального сообщества в соответствии с парадигмой открытой науки.

1 Введение

Современный уровень развития цифровых технологий, мобильной аналитики и платформ пространственных данных дает бизнесу возможность реализовывать персонализированный и географически адаптированный к запросам потребителей маркетинг. Активно развивается геомаркетинг, базисом которого является интеграция полученных с помощью геоинформационных (ГИС) и навигационных систем геоданных, социально-экономических и поведенческих характеристик целевых групп и бизнес-аналитики (*англ.* Business Intelligence, BI), что позволяет создавать динамические модели поведения аудитории, прогнозировать изменения рыночной активности в зависимости от территориальных факторов и повышать эффективность стратегического планирования. В целом же происходит активное формирование экосистемы геоаналитики, позволяющей широкому кругу акторов принимать обоснованные решения в бизнесе, управлении, городском развитии благодаря масштабному и прикладному использованию пространственных данных.

Применение геомаркетинга предполагает обращение к разнообразным источникам пространственной информации: данным систем глобального позиционирования (*англ.* Global Positioning System, GPS), вайфай-трекинга, биллинговых записей, открытых геопорталов, а также внутренней информации бизнеса, включая системы управления взаимоотношениями с клиентами (*англ.* Customer Relationship Management, CRM) и системы управления терминалами продаж (*англ.* Point of Sale, POS). Инструментами геомаркетинга выступают картографические визуализации, тепловые карты, буферный анализ, пространственная кластеризация, а также методы многокритериального моделирования с использованием ГИС. В геомаркетинге также широко применяются технологии искусственного интеллекта (*англ.* Artificial Intelligence, AI).

Популяризация AI-технологий привела к массовой реализации их в коммерческих решениях, в частности нейросетевых моделях глубокого обучения, обученных на закрытых наборах размеченных данных (датасетах), где ответственность за качество данных, юридические и этические ограничения лежит на коммерческом поставщике решения. Потребитель, таким образом, получает инструмент, который решает поставленные задачи, но не дает возможности полноценно изучить или оценить скрытые процессы и данные. С одной стороны, такие решения позволяют оценить тренды развития области геомаркетинга, с другой — не обеспечивают общего развития геомаркетинга академическим сообществом, герметизируя найденные подходы и алгоритмы под коммерческой лицензией. Алгоритмы, модели и обучение нейросетевых моделей страдают от так называемой проблемы черного ящика, не позволяющей пользователям узнать, каким образом получены результаты, и удостовериться в непредвзятости исследований, на основе которых разработаны встроенные в продукт алгоритмы [1].

Открытые и бесплатные ГИС могут решить проблему черного ящика. Однако, несмотря на гибкость и мощные аналитические возможности, использование технологий искусственного интеллекта в бесплатных ГИС сопряжено с рядом серьезных ограничений. Ключевое ограничение — высокий порог вхождения для аналитиков, требующий знаний не только в предметной области, но и в области программной инженерии. Действуя в условиях ограниченных вычислительных и сетевых ресурсов, практически невозможно обработать огромные массивы исходных геопространственных данных и обеспечить получение качественного результата в приемлемые сроки.

Ученому и эксперту уже недостаточно знать алгоритмы поиска решений или владеть аналитическими средствами обработки данных. В настоящее время требуется квалификация системного программиста, чтобы применять методы оптимизации алгоритмов и средства управления данными. При этом для масштабных работ требуется еще и квалификация системного архитектора, способного интегрировать облачные сервисы оркестрации виртуальных сред и вычислительных ядер, сервисы управления масштабированием ресурсов, маршрутизацией потоков данных, развертыванием вычислительных микросервисов и их коммутацией.

Коммерческие решения, ориентированные на применение в крупном бизнесе, значительно снижают этот порог вхождения, требующий квалификации в области программной инженерии, но при этом строго предопределяют способы решения задач и инструментарий. Коммерческий потребитель получает удобные масштабируемые решения, интегрированные с вычислительными кластерами, предоставляющими свои ресурсы по подписке или по объему использованных ресурсов. В дальнейшем коммерческих пользователей увлекают предоставляемыми за плату побочными инструментами визуализации, технологиями машинного обучения или интеграцией в бизнес-решения.

Таким образом, на развитие современной отрасли геоинформатики как комплекса методов научного познания влияют ресурсные ограничения, вызванные текущим уровнем развития вычислительной техники, необходимостью обработки больших объемов данных и квалификацией пользователей.

Цель настоящего исследования состоит в том, чтобы определить механизмы поддержки развития геомаркетинга на основании глубокого анализа наиболее распространенных на рынке ГИС коммерческого и некоммерческого сектора. В предлагаемой работе представлены ключевые материалы и результаты исследований, представляющие интерес как для развития теории и практики геоинформатики, так и для научных изысканий и аналитико-экспертной деятельности в области геомаркетинга.

2 Материалы и методы

2.1 Обзор популярных инструментов геомаркетинга

Для оценки трендов рынка средств геомаркетинговых исследований были отобраны популярные геомаркетинговые сервисы и ГИС, содержащие программные расширения (плагины) или подсистемы, с помощью которых можно производить маркетинговый пространственный анализ структурированных данных об активностях потребителей, деловой активности и анализ геопривязанных изображений для выявления классифицируемых объектов и их действий. Отдельное внимание было уделено анализу типов лицензий программных решений и способов получения непосредственного доступа к инструментам исследований. Следует отметить, что не все коммерческие ГИС позволяют на условиях одной приобретенной лицензии загрузить пространственные данные на требуемую территорию. Таким образом, практически всегда встает вопрос о приобретении пространственных данных либо об их самостоятельном сборе с использованием доступных средств.

Закрытые коммерческие решения также не всегда позволяют изучить используемые алгоритмы, отладить или улучшить их. При этом разные инструменты связаны с разными аспектами и алгоритмами пространственного анализа, предоставляя разные результаты, которые сложно напрямую сравнивать между собой, что препятствует развитию парадигмы открытой науки в эмпирических маркетинговых исследованиях [2].

Инструменты, предоставляемые по лицензионной модели открытого программного обеспечения (опенсорс, от *англ.* open-source), пользователи могут

бесплатно скачивать, изучать, отлаживать и развивать. Кроме того, можно стать участником сообщества, поддерживающего развитие того или иного открытого инструмента, что, несомненно, развивает область геомаркетинга, привнося в него новые методы решения отраслевых задач. Маркетинговые исследования, произведенные с использованием открытого программного обеспечения, соответствуют парадигме открытой науки и позволяют ученым публиковаться в изданиях, соблюдающих строгую политику открытости и прозрачности исследований, что высоко ценится в академической среде.

Популярными инструментами геомаркетинга являются:

1) **ArcGIS Business Analyst** (Esri, США) — профессиональное приложение от Esri для анализа торговых зон, построения изохрон, демографического профилирования и моделирования рыночного потенциала, которое распространяется как самостоятельное десктопное и как облачное приложение, доступное через обычный браузер; предоставляются демографические данные по всему миру, картографические векторные данные и точки интереса (*англ.* Point of Interest, POI), собранные в различных источниках и в FourSquare;
2) **RegioGraph** (GfK, Германия) — десктопная и облачная ГИС для выбора оптимальных локаций, анализа охвата, конкурентной разведки и зонирования с привязкой к маркетинговой статистике;
3) **WIGeoWeb / WIGeoLocation** (WIGeoGIS, Германия) — веб-платформы для построения комплексных визуальных диаграмм и картографической сегментации территорий, есть интеграция с системами бизнес-исследований (*англ.* Business Intelligence, BI);
4) **Predictive POS** (Galigeo, Франция) — SaaS-платформа (продажа программного обеспечения как услуги, *англ.* Software as a Service, SaaS) для прогнозирования выручки, оценки зон охвата и планирования точек продаж с использованием предиктивных моделей;
5) **MLight** (Marketing Logic, Россия) — геоинформационная CRM-платформа (*англ.* Customer Relationship Management, CRM) для малого и среднего бизнеса, включающая клиентские базы, GPS-трекинг, построение маршрутов, визуализацию точек и анализ эффективности;
6) **Geonet** (Marketing Logic, Россия) — онлайн-сервис для оценки покрытия сети, эффективности существующих точек и выявления зон с неохваченным спросом;
7) **CARTO** (CARTODB, Испания / США) — облачная платформа пространственной аналитики с мощной визуализацией, пространственным языком структурированных запросов (*англ.* Structured Query Language, SQL), шаблонами геомаркетинга и возможностями интеграции с BI-инфраструктурой;
8) **MarketMentor** (GbBIS, США) — веб-сервис для территориального планирования в ретейле и франчайзинге (торговые зоны, визуализация сегментов и автоматизированные отчеты);
9) **Fract** (Fract, США) — BI- и AI-платформа, автоматически генерирующая пространственные карты, поведенческие сегменты и аналитические сценарии с использованием технологий искусственного интеллекта;
10) **Polaris Intelligence** (Polaris Intelligence, Канада) — облачная система с продвинутой геоаналитикой, тепловыми картами, моделированием зон охвата и прогнозированием активности аудитории;
11) **SuperMap** (SuperMap Software Co., Китай) — пекинская профессиональная ГИС с модулями пространственного анализа, двух- и трехмерной картографии и BI-интеграцией, используемая в городском планировании, кадастре, транспорте, логистике и т. д., содержащая большой набор инструментов обработки данных с использованием технологий искусственного интеллекта;
12) **Whitebox GAT** (Whitebox Geospatial, Канада) — опенсорс-среда для пространственного анализа (тепловые карты, буферизация, кластеризация, морфометрический анализ);

13) **SAGA GIS** (University of Hamburg, Германия) — мощная ГИС-платформа с открытым кодом, ориентированная на геонаучный анализ, моделирование ландшафта и геостатистику;
14) **EIXOS** (Planol.info, Испания) — специализированная городская веб-ГИС для оценки деловой активности, рыночной концентрации и городской динамики;
15) **QGIS** (Международное сообщество разработчиков, первоначально — Швейцария) — одна из самых популярных ГИС с открытым кодом и широким сообществом, поддерживающая пространственный анализ с использованием расширений (например, Location Indicator, Business Analytics) и за счет интеграции с языком Python (активно используется в геомаркетинге для зонирования, кластеризации потребителей, анализа транспортной доступности и визуализации данных из CRM- и BI-систем);
16) **Placer.ai** (Placer Labs, США) — облачная платформа геомаркетинговой аналитики, которая с помощью анонимных мобильных данных позволяет оценивать офлайн-трафик, поведение клиентов, зоны притяжения и конкурентное окружение.

В табл. 1 приведены данные о моделях лицензирования описанных инструментов геомаркетинга.

Таблица 1
Модели лицензирования инструментов геомаркетинга
Table 1
Geomarketing tools licensing models

Модель лицензирования	Инструменты	
Платная	ArcGIS Business Analyst RegioGraph WIGeoWeb MLight	Geonet Fract Polaris Intelligence SuperMap
Подписка	Predictive POS CARTO MarketMentor Placer.ai	
Бесплатная (опенсорс)	Whitebox GAT SAGA GIS QGIS	
По запросу / партнерство	EIXOS	

Бесплатные открытые ГИС не имеют четкой отраслевой специализации, при этом нередко одни и те же расширения могут использоваться в нескольких решениях. Например, модули SAGA и Whitebox могут быть встроены в ArcGIS и QGIS. Бесплатные ГИС поставляются без предустановленных пространственных данных, готовых к непосредственной обработке, и без доступа к качественным геопространственным данным, используемым в геомаркетинге (в лучшем случае с обзорными мировыми картами и демонстрационными фрагментами). Коммерческие решения зачастую предоставляют неограниченный или ограниченный доступ к наборам данных, содержат преднастроенные модули регрессионного анализа, кластеризации и модели глубокого обучения с примерами, которые помогают пользователям, хотя при этом и вводят их в определенные рамки. В случае с коммерческой ArcGIS в десктопной или облачной версии предоставляется доступ к собственным каталогам данных (WMS/WFS/POI) через соответствующие интерфейсы. Доступ платный, но он позволяет получить готовые данные в приемлемом качестве практически на любую территорию.

Опенсорс-платформы, такие как, например, QGIS, SAGA GIS, имеют высокую гибкость настройки и интеграции — от подключения CRM- и BI-систем до встраивания пространственных сценариев во внутренние процессы компаний. При высоком уровне квалификации пользователя опенсорс-платформы позволяют применять широкий спектр AI-технологий, включая машинное зрение (например, для анализа спутниковых снимков), глубокое обучение (для поведенческого моделирования), кластеризацию (в задачах сегментации клиентов) и предиктивную аналитику (для оценки рыночного потенциала локаций).

2.2 Тренды использования технологий искусственного интеллекта в геомаркетинге

В современных ГИС уже активно используются следующие ключевые AI-технологии:

- машинное зрение — для обработки спутниковых снимков, потоков изображений систем видеонаблюдения (*англ.* Closed Circuit Television, CCTV), построения сплошной карты расстояний до препятствий (*англ.* Light Detection and Ranging, LiDAR) и анализа городской активности по изображениям (например, применяется в Orbital Insight Go, Placer.ai);
- глубокое обучение — для прогнозирования спроса, кластеризации районов, построения поведенческих моделей и трендов (CARTO, Orbital Insight Go);
- автоматическая кластеризация — методы k-средних, DBSCAN, HDBSCAN (CARTO, Polaris);
- автоматическое построение моделей машинного обучения без программирования (*англ.* Automated Machine Learning / Machine Learning Pipeline) (CARTO);
- геопространственные модели AI — использование координат, плотности, маршрутов и зон влияния в обучении моделей (CARTO, Placer.ai, Orbital Insight Go).

Можно также выделить перспективные методы обработки данных, которые находятся в стадии активной разработки:

- статистические методы, включая различные виды регрессионного анализа (например, метод наименьших квадратов позволяет найти влияние плотности населения, уровня дохода, близости к крупным транспортным узлам на показатели посещаемости или объема продаж);
- методы пространственной регрессии: модель пространственного лага (*англ.* Spatial Lag Model, SLM), модель с пространственной зависимостью в ошибках (*англ.* Spatial Error Model, SEM); географически взвешенная регрессия с нестационарной весовой матрицей (*англ.* Geographically Weighted Regression, GWR), подготавливаемой на основе пространственно взвешенной нейронной сети или географически взвешенного многослойного персептрона (*англ.* Geographically Weighted Multilayer Perceptron, GWMLP) [3], для которых необходимо учитывать особенности территориально больших, неоднородных стран, таких как Россия, где соседство территорий или расстояния между ними играют меньшую роль, чем активность социальных и бизнес-связей между территориями, вносящих свой пространственный лаг в методы оценивания [4];
- использование потоков видеоданных с уличных камер наблюдения для сбора информации о потребительском трафике, экономической активности [5];
- набор инструментов геопространственного искусственного интеллекта для формирования геопространственного окружения (*англ.* GeoAI), включая распознавание геопространственных объектов по фотоснимкам с использованием сверточных нейронных сетей (*англ.* Convolutional Neural Network, CNN) [6], автоматическую картогенерацию по текстовым описаниям и командам оператора (MapGPT) [7], автономную языковую нейросеть, способную по языковым запросам самостоятельно определять набор инструментов и данных для построения аналитических геопространственных данных (LLM-Geo) [8];
- регрессионные методы на основе случайного леса (*англ.* Random Forest Regressor, RFR) и улучшенные версии случайных лесов, показывающие высокое качество при прогнозировании продаж или трафика на базе множества факторов (POI, демография, транспорт) (например, при прогнозировании тенденций горячих продаж товаров используется метод, основанный на ансамблевой модели обучения, объединяющий несколько методов машинного обучения, включая экстремальный градиентный

бустинг (*англ.* Extreme Gradient Boosting, XGBoost) и фреймворк LightGBM, позволяющие производить анализ связей между характеристиками товаров и тенденциями продаж на розничном рынке [9].

3 Результаты и обсуждение

3.1 Преимущества использования средств геомаркетинга для бизнеса

Применение технологий геомаркетинга существенно влияет на экономический рост в краткосрочной перспективе, особенно в ситуациях массового изменения пользовательских предпочтений, выхода на рынок новых брендов, появления высоко востребованных товаров, и в целом стимулирует развитие бизнеса. Предприниматели избегают ошибочных решений при открытии своих предприятий там, где это невыгодно или высока конкуренция. Торговые сети стремятся открывать свои представительства там, где негативное влияние конкурентов либо отсутствует, либо минимально. При этом современный темп принятия решений требует создания сразу тысяч точек по всей стране с максимальной выгодой. Строгий расчет при открытии предприятия и учет всех факторов влияния на бизнес требует сбора огромного массива информации по городам, и в случае отсутствия непрерывной актуализации и качественной фильтрации данных у провайдеров использование таких массивов может стать причиной ошибочных решений и существенных убытков для бизнеса.

В случае с открытым рыночным подходом предприниматель, как правило, не имеет абсолютной уверенности в том, что выбранный им провайдер обеспечит предоставление таких данных и решений, которые по объему, качеству, наполненности и другим параметрам полностью соответствуют запросам развития его бизнеса. При ответственном национальном подходе, когда государство заинтересовано в развитии предпринимательской активности, предполагается, что государственные сервисы могут обеспечить предоставление достаточно качественной опорной информации, которая затем может развиваться различными рекламными и информационными провайдерами, насыщая базовые пространственные объекты сведениями об экономической деятельности и потенциале. Для должной защиты коммерческой информации необходимо гарантировать не только обезличивание данных, но и предоставление их через целевой результат, когда пользователь получает данные в предварительно обработанном виде и формирует конвейер их дальнейшей обработки для своих целей, не имея доступа к исходной информации.

3.2. Основные сервисы, которые необходимы для реализации доступности геомаркетинговой аналитики

К основным технологиям, которым, по нашему мнению, необходимо обеспечить поддержку в создаваемых платформах с AI-интерфейсами, относятся:

- сервисы подключения к закрытым данным для сбора агрегированных данных в закрытых конвейерных системах обработки данных;
- сервисы машинного зрения для первичной обработки видеоданных и фотоснимков с целью извлечения классифицированных объектов, их состояния и действий;
- закрытые сервисы, имеющие доступ к чувствительной информации, но позволяющие выполнить агрегирующие операции;

- сервисы автоматического машинного обучения (*англ.* Automated Machine Learning, AutoML), способные по целевому описанию от исследователя самостоятельно сформировать конвейеры, включающие нейросетевые модели обработки данных;
- сервисы конкретных действий с агрегатами данных (пространственные регрессионные методы, сверточные нейронные сети, графовые вычислители);
- сервисы персонифицированной выдачи результирующих наборов, визуализации показателей, настройки процессных конвейеров обработки данных.

В качестве примера можно рассмотреть задачу по созданию конвейера расчета оценки страхового потенциала лиц, проживающих на определенной территории. Для составления аналитических конвейеров обработки данных будем использовать существующий набор витрин Национальной системы управления данными, а также создаваемые в рамках задачи новые витрины данных и витрины агрегированных регламентированных запросов.

Используя существующие витрины данных Федеральной налоговой службы (ФНС) «Сведения о занятости» и «Сведения о регистрации физических лиц в системе обязательного страхования» через закрытую связь с витриной данных ФНС «Государственный адресный реестр. Федеральная информационная адресная система», можно создать регламентированный запрос ФНС «Агрегат охвата страхованием по месту проживания», предоставляя индексированный по адресному идентификатору набор данных о наличии застрахованных лиц, не требующий процедур санитизации.

Для геоинформационной части аналитики необходимо получить пространственный набор адресных идентификаторов в границах исследуемой территории. Для этого необходимо создать витрину данных Национальной системы пространственных данных Росреестра «Список кадастровых номеров в заданных границах», которая будет по набору пространственных координат территории формировать набор данных о кадастровых номерах земельных участков, расположенных в границах территории. Следом потребуется набор адресных идентификаторов по полученному набору кадастровых номеров. Для этого необходимо создать регламентированный запрос в витрине данных Росреестра «Идентификаторы Государственного адресного реестра по кадастровым номерам».

Таким образом, мы получаем возможность сопоставить адреса и места проживания незастрахованных лиц в указанных границах. Для формирования итоговой оценки необходимо подготовить регламентированный запрос в витрине данных Национальной системы пространственных данных Росреестра «Сведения о государственной оценке по адресу», используя в качестве параметра связи адресный идентификатор и набор данных, полученный на предыдущем шаге.

Внешним аналитикам предоставляется доступ к построителю конвейеров, в меню которого представлены доступные элементы получения и обработки наборов данных. Среди элементов присутствуют открытые витрины данных органов власти, агрегированные запросы, обеспечивающие сбор данных с закрытых витрин, а также элементы трансформации, фильтрации и обработки нейросетевыми моделями.

3.3 Возможные пути преодоления барьеров

По нашему мнению, в опенсорсных ГИС для бизнеса следует преимущественно развивать следующие перспективные направления повышения доступности AI-инструментов.

1. **Разработка интерфейсов минимального программного кодирования (*англ.* low-code).** Необходимо создание плагинов и расширений с графическим пользовательским интерфейсом для запуска типовых AI-сценариев без программирования, таких как визуальный выбор тренировочных классов, запуск предобученных моделей, экспорт

результатов в карту. Примером может служить платформа маркетинговой аналитики KNIME [10], на которой учитывают потребности маркетингового статистического, текстового анализа и методы, касающиеся контролируемого, неконтролируемого и глубокого обучения. Платформа подключена к более чем тремстам источникам информации, включая международные соцсети и распространенные системы учета и обработки бизнес-данных. Она обладает удобным визуальным интерфейсом, позволяющим производить комплексные статистические исследования, соединяя между собой узлы процесса обработки данных. Применение техники визуального кодирования значительно упрощает работу аналитиков, а готовые примеры процессов и наборов данных снижают порог вхождения. Несмотря на то, что у платформы отсутствуют геопространственные данные и фильтры их обработки, следует признать такую low-code-модель распространения технологий обработки данных и машинного обучения достаточно эффективной и прозрачной для развития академического знания в области геомаркетинга.

2. **Облачные процессинговые сервисы и AI-интерфейсы.** Примером могут служить результаты изучения потребительских действий на территории города Тебриза (Иран), где исследователям были доступны сведения о банковских транзакциях и точках проведения платежей, что позволило создать идеальную карту потребительского поведения [11]. Однако в таких случаях возникает вопрос о безопасности персональных данных, даже с учетом обезличенности персональных идентификаторов. На наш взгляд, предоставление таких данных недопустимо, и должна обеспечиваться их неприкосновенность. Результатом исследования [11] стала карта потребительского поведения по типам покупок и объемам средств. Именно результирующая карта или сведения из нее могут быть предоставлены академическому сообществу, ретейлу, коммерческим и логистическим компаниям для изучения пространственного потенциала. Для устранения барьера и достижения согласованности между защитой персональных данных и открытым доступом со стороны пользователей необходимо внедрить в эквайринговые системы российских банков и в Росреестр облачные AI-интерфейсы, ограничивающие доступ к исходной информации о персональной недвижимости, о факторах, влияющих на кадастровую стоимость объектов, и о проводимых платежах, но предоставляющих доступ к агрегированным результатам обработки данных относительно заданных параметров, включая открытые данные (такие, например, как сведения о разрешенном использовании объектов, зонах с особыми условиями использования территорий, адресных ориентирах). С целью построения конвейеров обработки данных следует использовать лямбда-вычислители, фильтры, сверточные сети, регрессионные модели и модели глубокого обучения, обеспечивающие шаги обработки данных для получения аналитического результата. При этом важно обеспечить удобный персонифицированный доступ к AI-интерфейсам из опенсорсной ГИС по аналогии с AI-интерфейсами Google Earth Engine, Microsoft AI for Earth, OpenAI API, Hugging Face. Таким образом, российские ученые и эксперты в области геомаркетинга получат, во-первых, доступ к актуальным данным без возможности скопировать исходные данные, извлечь чувствительную информацию и, во-вторых, доступные и прозрачные методы обработки данных, которыми можно делиться с другими учеными, исследователями и т. д.
3. **Интеграция AutoML.** Внедрение AutoML-инструментов, автоматически подбирающих модели и параметры обучения, может значительно упростить анализ. В QGIS уже появляются эксперименты с AutoML-фреймворками через Python (например, AutoSklearn, H2O.ai). Необходимо создание сервисов подбора инструментов внутри пользовательских интерфейсов платформы, на которой можно визуально создавать конвейеры обработки данных.

4. **Библиотеки предобученных моделей.** Требуется формирование открытых репозиториев с предобученными AI-моделями, ориентированными на типовые бизнес-задачи (например, классификация зон по спросу, прогноз трафика, определение зон охвата торговых точек, классификация делового, потребительского, туристического поведения объектов в зонах сбора видеоаналитики). Кроме того, необходимы онтологические пространственные модели для обработки связей между объектами и их описаниями языковыми моделями искусственного интеллекта [8, 12].
5. **Стандартизация данных в целях интероперабельности.** Интерфейсы пространственных данных позволяют проводить не только конкретные отраслевые исследования относительно профиля данных, но и междисциплинарные исследования в различных областях, используя агрегируемые данные, однако при этом возрастает потребность в стандартизации форматов данных и методах их сбора и накопления. Очень важно интегрировать социальные данные, собираемые людьми в результате взаимодействий со средой, официальные базовые данные и представление строго защищенных чувствительных данных [13]. Необходимо проводить экспертную оценку качества данных и обеспечивать дальнейшее непрерывное обновление данных, накапливаемых из различных источников, с использованием средств формально-логического контроля. Оператор данных в результате получает возможность обеспечивать их непротиворечивость, интерпретируемость и интероперабельность для дальнейшей массовой обработки и запуска конвейеров обработки и выдачи потребителям.
6. **Обучение технологиям искусственного интеллекта в геомаркетинге.** Для снижения входного порога экспертов в области геомаркетинга необходима разработка открытых процессных конвейеров и учебных курсов, пошагово описывающих, как использовать AI-модули в геомаркетинге с минимальной технической подготовкой. Это позволит обеспечить доступность платформ, поддерживающих AI-интерфейсы на уровне государства. Расширение доступности пространственной аналитики, использующей модули машинного обучения, включая инструменты глубокого обучения в опенсорсных ГИС, — важная задача, реализация которой позволит бизнесу использовать мощные инструменты пространственного анализа без необходимости перехода к дорогим коммерческим платформам.
7. **Поддержка на национальном уровне.** Органы государственной власти способны создавать условия для разработки и внедрения открытых AI-инструментов на базе отечественных и свободно распространяемых ГИС путем реализации мер нормативной и инфраструктурной поддержки. Возможна грантовая поддержка пилотных проектов по созданию визуальных AI-плагинов для ГИС, ориентированных на интеграцию государственных AI-интерфейсов в процесс обработки данных без возможности непосредственного доступа к исходной информации. Целесообразным является создание национального репозитория открытых предобученных моделей и примеров пространственных данных — аналог Hugging Face, GeoHub, но с фокусом на локальных задачах. Перспективным является обеспечение условий для разработки образовательных платформ, содержащих учебные пособия с примерами типовых сценариев анализа данных Росстата, Росреестра, Федеральной информационной адресной системы, Единой государственной информационной системы социального обеспечения и иных государственных сервисов, содержащих пространственные данные, перспективные для использования при решении задач геомаркетинга (например, государственные информационные системы обеспечения градостроительной деятельности) [14]. Академическое сообщество способно сформировать методологическую основу и обеспечить подготовку специалистов для разработки AI-решений и их адаптации под задачи пространственного маркетинга, включая разработку междисциплинарных курсов на стыке ГИС, машинного обучения, социологии и экономики с их последующей реализацией на базе университетов

и школ информационных технологий. Профессиональные разработчики могут обеспечить адаптацию решений под реальные задачи бизнеса и их тиражирование в прикладной среде. В частности, они могут разрабатывать и предоставлять в открытом доступе плагины с графическим интерфейсом для ГИС, позволяющие запускать AI-модели без программирования, используя технологии low- и no-code, а также публиковать открытые шаблоны для типичных бизнес-сценариев (выбор локаций, анализ трафика, прогноз сегмента). Важно также создавать и поддерживать опенсорс-сообщества вокруг AI в ГИС с собственными репозиториями, форумами и кейсами на базе GitFlic, GitHub, осуществлять партнерство с компаниями, предоставляющими открытые пространственные данные или мобильную аналитику (например, 2ГИС, NextGIS, Placer.ai в деморежиме).

4 Выводы

Ценность представленных в работе результатов связана с формированием перспективных направлений преодоления существующих в развитии геомаркетинга ограничений. Ряд предложений авторов направлен на решение одной из основных проблем в проведении научных исследований и выполнении экспертно-аналитических работ в сфере геомаркетинга — высокого порога входа, когда для реализации даже базовых инструментов машинного обучения пользователю необходимо обладать продвинутыми знаниями в области программирования, владеть инструментами работы с пространственными данными (GDAL, OGR), а также уверенно использовать библиотеки машинного обучения, такие как scikit-learn, Keras, TensorFlow, XGBoost, PyTorch. Кроме того, интеграция AI-моделей в процессы геоаналитики требует навыков написания или настройки плагинов, часто с использованием Python или R, что существенно ограничивает возможность применения таких инструментов в бизнес-среде, где приоритетом выступают простота интерфейса, скорость внедрения и минимальные требования к технической подготовке персонала. Показана также целесообразность разработки открытых процессных конвейеров и курсов для открытия возможности применения AI-модулей в геомаркетинге пользователями с минимальной технической подготовкой.

Отдельное внимание уделено формированию подходов к достижению согласованности между защитой персональных данных и открытым доступом со стороны пользователей посредством внедрения облачных процессинговых сервисов и AI-интерфейсов, сделан фокус на необходимости стандартизации данных.

Для развития российского сегмента геомаркетинга предложена реализация ответственного национального подхода, при котором государственные сервисы предоставляют качественную опорную информацию, необходимую и достаточную для развития бизнеса, реализован широкий спектр AI-интерфейсов государственных сервисов, созданы различные национальные репозитории (репозиторий открытых предобученных моделей, репозиторий примеров пространственных данных и т. п.).

Реализация представленных результатов исследования обеспечит формирование экосистемы прикладной геоаналитики, доступной широкому кругу пользователей без дорогостоящих лицензий и технических барьеров.

благодарности Работа выполнена в рамках проекта FSFE-2026-0015.

библиография

1. Sharma R., Kumar A., Chuah C. Turning the Blackbox into a Glassbox: An Explainable Machine Learning Approach for Understanding Hospitality Customer // International Journal of Information Management Data Insights. 2021. Vol. 1. Is. 2. P. 100050. DOI:10.1016/j.jjimei.2021.100050.

2. Deer L., Adler S., Datta H., et al. Toward Open Science in Marketing Research // International Journal of Research in Marketing. 2025. Vol. 42. Iss. 1. P. 212–233. DOI:10.1016/j.ijresmar.2024.12.005.
3. Ansari O., Binninger F. A Deep Learning Approach for Estimation of Price Determinants // International Journal of Information Management Data Insights. 2022. Vol. 2. Iss. 2. P. 100101. DOI:10.1016/j.jjimei.2022.100101.
4. Демидова О.А. Методы пространственной эконометрики и оценка эффективности государственных программ // Прикладная эконометрика. 2021. № 4 (64). С. 107–134. DOI:10.22394/1993-7601-2021-64-107-134.
5. Al-Azizi J., Shafri H., Hashim S., et al. DeepAutoMapping: Low-Cost and Real-Time Geospatial Map Generation Method Using Deep Learning and Video Streams // Earth Science Informatics. 2022. Vol. 15. P. 1481–1494. DOI:10.1007/s12145-020-00529-7.
6. Yu D., Ji S. A New Spatial-Oriented Object Detection Framework for Remote Sensing Images // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2022. Vol. 60. P. 1–16. DOI:10.1109/TGRS.2021.3127232.
7. Zhang Y., He Z., Li J., et al. MapGPT: An Autonomous Framework for Mapping by Integrating Large Language Model and Cartographic Tools // Cartography and Geographic Information Science. 2024. Vol. 51. Iss. 6. P. 717–743. DOI:10.1080/15230406.2024.2404868.
8. Li Z., Ning H. Autonomous GIS: The Next-Generation AI-Powered GIS // International Journal of Digital Earth. 2023. Vol. 16. Iss. 2. P. 4668–4686. DOI:10.1080/17538947.2023.2278895.
9. Deng Ch., Liu X., Zhang J., et al. Prediction of Retail Commodity Hot-Spots: A Machine Learning Approach // Data Science and Management. 2025. Vol. 8. Iss. 4. P. 414–422. DOI:10.1016/j.dsm.2025.02.003.
10. Villarroel Ordenes F., Silipo R. Machine Learning for Marketing on the KNIME Hub: The Development of a Live Repository for Marketing Applications // Journal of Business Research. 2021. Vol. 137. P. 393–410. DOI:10.1016/j.jbusres.2021.08.036.
11. Feizizadeh B., Omarzadeh D., Blaschke T. Spatiotemporal Mapping of Urban Trade and Shopping Patterns: A Geospatial Big Data Approach // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2024. Vol. 128. P. 103764. DOI:10.1016/j.jag.2024.103764.
12. Shimizu C., Stephen S., Barua A., et al. The KnowWhereGraph Ontology // Journal of Web Semantics. 2025. Vol. 84. P. 100842. DOI:10.1016/j.websem.2024.100842.
13. Casali Y., Aydin N., Comes T. Machine Learning for Spatial Analyses in Urban Areas: A Scoping Review // Sustainable Cities and Society. 2022. Vol. 85. P. 104050. DOI:10.1016/j.scs.2022.104050.
14. Тарарин А.М. Цифровая трансформация градостроительной деятельности // Вестник СГУГиТ. 2021. Т. 26, № 1. С. 110–121. DOI:10.33764/2411-1759-2021-26-1-110-121.

авторы

Родионова Юлия Валерьевна
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра управления недвижимостью и развитием территорий,
факультет управления территориями
канд. техн. наук
0000-0002-5946-6361

Тарарин Андрей Михайлович
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра управления недвижимостью и развитием территорий,
факультет управления территориями
канд. техн. наук, доцент
0000-0003-2460-4434

Поступила 03.08.2025. Принята к публикации 23.06.2026. Опубликована 30.06.2026.

UDC 004.9:004.62:004.8
DOI:10.30533/GiA-2026-027

CC BY

Building of the Geoanalytics Ecosystem: Challenges and Solutions in the Development of Geomarketing

Julia V. Rodionova[1] ✉, **Andrei M. Tararin**[1]

[1] Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
✉ rodionova.moscow@yandex.ru

citation Rodionova JuV, Tararin AM. Building of the Geoanalytics Ecosystem: Challenges and Solutions in the Development of Geomarketing. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2026;70(3): 70–83. DOI:10.30533/GiA-2026-027.

keywords geoanalytics, geomarketing, geographic information system, artificial intelligence, open-source software, government service

abstract The article is devoted to the study of topical aspects of the development of the ecosystem of applied geoanalytics with an emphasis on the formation of promising areas for overcoming existing limitations in the development of geomarketing. The paper presents the results of an in-depth analysis of popular geomarketing tools in the commercial and non-profit sectors, key AI-technologies used in them, data processing methods, specifics of access to high-quality geospatial data and ensuring personal data protection. The main problems that arise when conducting scientific research and performing expert analytical work in the field of geomarketing are described, separately when using commercial software solutions and separately when using tools provided under the licensed open-source software model. The authors have developed and described the following ways to overcome existing limitations and barriers in the development of free (open-source) GIS: the development of low-code interfaces, the development of cloud processing services and AI-interfaces, AutoML integration, the formation of libraries of pre-trained models, data protection and standardization. Special attention was paid to the development of the Russian segment of geomarketing, proposals were made on promising measures to support its development at the national level, and the expediency of implementing a responsible national approach in which government services provide high-quality reference information necessary for the implementation of geomarketing research was shown. The research results represent a contribution to the development of an ecosystem of applied geoanalytics, focused on accessibility to a wide range of users – without expensive licenses, technical barriers and with extensive opportunities to implement various promising developments of the professional community in accordance with the paradigm of open science.

acknowledgements The research was carried out according to the project FSFE-2026-0015.

references

1. Sharma R, Kumar A, Chuah C. Turning the Blackbox into a Glassbox: An Explainable Machine Learning Approach for Understanding Hospitality Customer. ***International Journal of Information Management Data Insights.*** 2021;1(2): 100050. DOI:10.1016/j.jjimei.2021.100050.
2. Deer L, Adler S, Datta H, et al. Toward Open Science in Marketing Research. ***International Journal of Research in Marketing.*** 2025;42(1): 212–233. DOI:10.1016/j.ijresmar.2024.12.005.
3. Ansari O, Binninger F. A Deep Learning Approach for Estimation of Price Determinants. ***International Journal of Information Management Data Insights.*** 2022;2(2): 100101. DOI:10.1016/j.jjimei.2022.100101.
4. Demidova OA. Metody prostranstvennoi ekonometriki i otsenka effektivnosti gosudarstvennykh programm [Methods of Spatial Econometrics and Evaluation of the Effectiveness of Government Programs]. ***Applied Econometrics.*** 2021;4(64): 107–134. (In Russian). DOI:10.22394/1993-7601-2021-64-107-134.
5. Al-Azizi J, Shafri H, Hashim S, et al. DeepAutoMapping: Low-Cost and Real-Time Geospatial Map Generation Method Using Deep Learning and Video Streams. ***Earth Science Informatics.*** 2022;15: 1481–1494. DOI:10.1007/s12145-020-00529-7.
6. Yu D, Ji S. A New Spatial-Oriented Object Detection Framework for Remote Sensing Images. ***IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.*** 2022;60: 1–16. DOI:10.1109/TGRS.2021.3127232.
7. Zhang Y, He Z, Li J, et al. MapGPT: An Autonomous Framework for Mapping by Integrating Large Language Model and Cartographic Tools. ***Cartography and Geographic Information Science.*** 2024;51(6): 717–743. DOI:10.1080/15230406.2024.2404868.
8. Li Z, Ning H. Autonomous GIS: The Next-Generation AI-Powered GIS. ***International Journal of Digital Earth.*** 2023;16(2): 4668–4686. DOI:10.1080/17538947.2023.2278895.
9. Deng Ch, Liu X, Zhang J, et al. Prediction of Retail Commodity Hot-Spots: A Machine Learning Approach. ***Data Science and Management.*** 2025;8(4): 414–422. DOI:10.1016/j.dsm.2025.02.003.
10. Villarroel Ordenes F, Silipo R. Machine Learning for Marketing on the KNIME Hub: The Development of a Live Repository for Marketing Applications. ***Journal of Business Research.*** 2021;137: 393–410. DOI:10.1016/j.jbusres.2021.08.036.
11. Feizizadeh B, Omarzadeh D, Blaschke T. Spatiotemporal Mapping of Urban Trade and Shopping Patterns: A Geospatial Big Data Approach. ***International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.*** 2024;128: 103764. DOI:10.1016/j.jag.2024.103764.
12. Shimizu C, Stephen S, Barua A, et al. The KnowWhereGraph Ontology. ***Journal of Web Semantics.*** 2025;84: 100842. DOI:10.1016/j.websem.2024.100842.
13. Casali Y, Aydin N, Comes T. Machine Learning for Spatial Analyses in Urban Areas: A Scoping Review. ***Sustainable Cities and Society.*** 2022;85: 104050. DOI:10.1016/j.scs.2022.104050.
14. Tararin AM. Tsifrovaya transformatsiya gradostroitel'noi deyatel'nosti [Digital Transformation of Urban Planning Activities]. ***Vestnik SSUGT.*** 2021;26(1): 110–121. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2021-26-1-110-121.

authors

Julia V. Rodionova
Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Real Estate Management and Territory Development,
Faculty of Territory Management
PhD in Engineering
0000-0002-5946-6361

Andrei M. Tararin
Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Real Estate Management and Territory Development,
Faculty of Territory Management
PhD in Engineering, Associate Professor
0000-0003-2460-4434

Submitted: August 3, 2025. Accepted: June 23, 2026. Published: June 30, 2026.

УДК 528.44:504.5.06:332.3
DOI:10.30533/GiA-2026-028

CC BY

Система контролируемых показателей мониторинга состояния земель в районах активного вулканизма

А.А. Верхотуров[1]

[1] Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Южно-Сахалинск, Россия
ussr-91@mail.ru

цитирование Верхотуров А.А. Система контролируемых показателей мониторинга состояния земель в районах активного вулканизма // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 3. С. 84–96. DOI:10.30533/GiA-2026-028.

ключевые слова вулканическая опасность, деградация земель, мониторинг состояния земель, дистанционное зондирование Земли, система контролируемых показателей, степень развития негативного процесса

аннотация Проблема мониторинга последствий вулканической деятельности для земельных ресурсов остается недостаточно разработанной, в то время как действующие системы ориентированы преимущественно на прогноз извержений. При этом отсутствует унифицированная система оценки именно состояния земель как возобновляемого ресурса, а существующие подходы носят точечный или описательный характер. Целью исследования стала разработка комплексной системы контролируемых показателей (СКП) для оценки состояния земель в районах активного вулканизма. На основе ретроспективного анализа последствий извержений, данных дистанционного зондирования Земли и полевых исследований была создана СКП, учитывающая все основные типы вулканических воздействий (лавовые и пирокластические потоки, обломочные лавины, лахары, пеплопады) и включающая ключевые количественные показатели: площадь воздействия, долю нарушенного почвенно-растительного покрова, аномалию нормализованного относительного индекса растительности, мощность тефры и отложений лахаров, площадь полного погребения, степень повреждения инфраструктуры. Разработка проводилась в три этапа (аналитический, отбор и верификация показателей, установление пороговых значений). На базе СКП разработана шкала степени развития негативного процесса с тремя градациями (сильная, средняя, слабая), основанная на пороговых значениях нарушения почвенно-растительного покрова. Предложенная система обеспечивает переход от описательных оценок к стандартизированному количественному мониторингу и формирует основу для ведения государственного мониторинга земель, зонирования территорий и планирования восстановительных мероприятий в вулканически активных регионах, что особенно актуально для Курило-Камчатского региона.

1 Введение

До 14,5 % населения мира проживает в районах, подверженных воздействию опасных вулканических процессов [1], включая Курило-Камчатский регион, остров Ява, Анды, Каскады, Центральную Америку, Италию и др. Деятельность вулканов представляет собой ключевой фактор риска деградации земельных ресурсов во многих геодинамически активных регионах планеты. Лавовые потоки, пирокластические потоки, выпадение тефры, газовые эмиссии и лахары наносят комплексный ущерб землям: уничтожают почвенно-растительный покров, вызывают химическое загрязнение, изменяют рельеф и гидрологический режим территории. Это приводит к долгосрочной потере продуктивности сельхозугодий и пастбищ, деградации природных экосистем, повреждению инфраструктуры и ограничению доступности земель для хозяйственного использования. Актуальной научной проблемой в области землеустройства, кадастра и мониторинга земель является отсутствие унифицированной системы, которая бы фокусировалась именно на текущем состоянии и динамике земельных ресурсов, подверженных вулканическим воздействиям. Главная задача развитых сетей мониторинга предвестников извержений (сейсмичность, деформации, газовые эмиссии), например сети Национального института геофизики и вулканологии (*итал.* Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, INGV) в Италии или Геологической службы США (*англ.* United States Geological Survey, USGS), состоит в прогнозировании извержений, а не в оценке последствий для земель как возобновляемого ресурса[1] [2, 3]. Существующие оценки ущерба часто носят точечный или описательный характер, отсутствуют стандартизированные показатели и пороги для оценки степени негативного воздействия на земельные ресурсы.

Имеются отдельные разработки, апробированные в разных регионах (Патагония, Новая Зеландия и др.), по оценке воздействия отложений тефры на сельскохозяйственные земли [4, 5]. В Италии на основе спутникового мониторинга, включая информацию о деформации поверхности, температуре поверхности суши, выбросах диоксида серы и гравитационных аномалиях, контролируется состояние активности вулкана Этна [6]. В Никарагуа проводят исследования по обоснованию мониторинга концентрации SO_2 в атмосферном воздухе при извержениях вулкана Масая [7]. В США изучаются деформации вулканических построек с помощью спутниковой радиолокационной интерферометрии (InSAR), системы глобального позиционирования (GPS) и нивелирования [8]. Многообразны методы оценки воздействия извержений вулканов на растительный покров [9–11].

Проводимые в разных странах исследования вносят значительный вклад в понимание вулканических процессов и их последствий, однако системный подход к оценке состояния земель как объекта мониторинга требует дальнейшей разработки.

Цель исследования — разработать комплексную, научно обоснованную систему контролируемых показателей (СКП) для мониторинга состояния земель в районах активного вулканизма, включающую критерии оценки степени развития негативного процесса (СРНП).

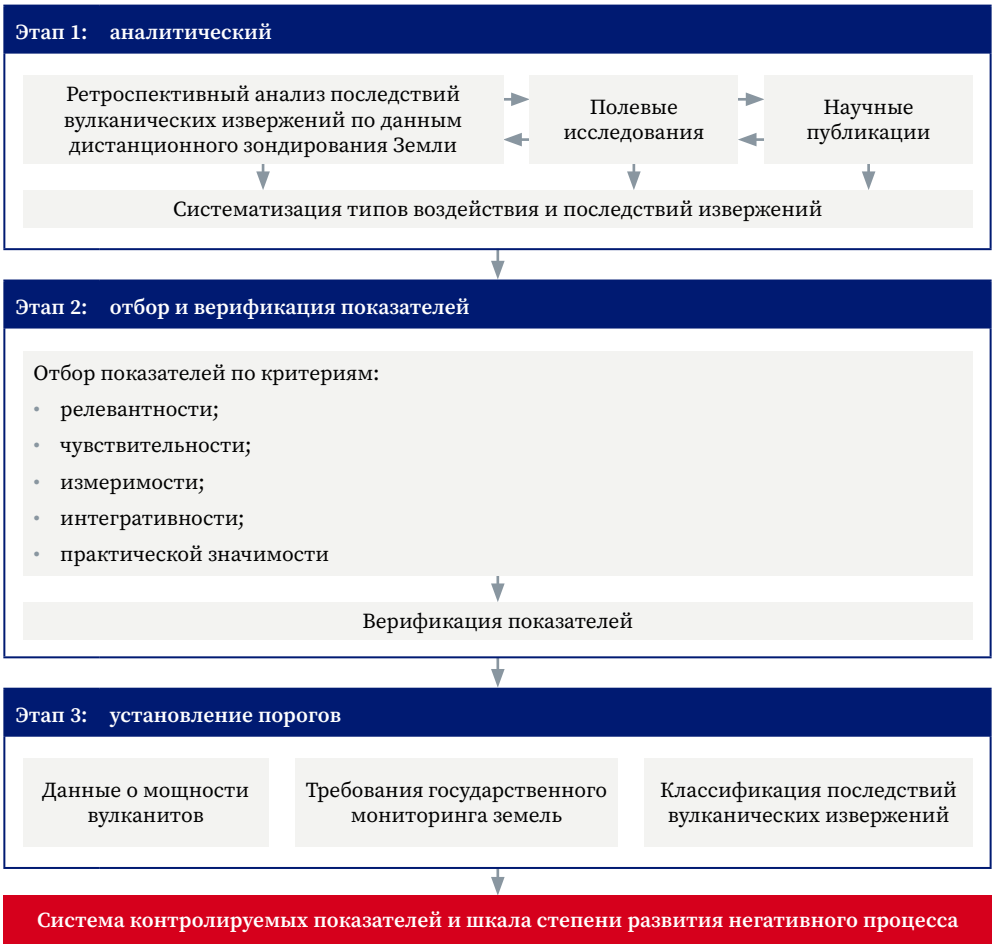
2 Материалы и методы

Разработка СКП и шкалы СРНП проводилась в три последовательных этапа, в основе которых лежали принципы системности, ретроспективного анализа и практической применимости (рис. 1).

1 Ewert J.W., Guffanti M., Murray T.L. An Assessment of Volcanic Threat and Monitoring Capabilities in the United States: Framework for a National Volcano Early Warning System // US Geological Survey Open-File Report. 2005. No. 2005-1164. 62 p.

Рис. 1
Методика разработки системы контролируемых показателей и шкалы степени развития негативного процесса

Fig. 1
Methodology for the development of a system of controlled indicators and a scale of the degree of development of the negative process



На первом этапе был проведен ретроспективный анализ последствий исторических и современных извержений в различных вулканических регионах, включая Камчатку, Курильские острова, Патагонию и Новую Зеландию. Материалами для анализа послужили:

- данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ);
- авторские полевые исследования на вулканоопасных территориях Курильских островов, выполненные в период с 2017 по 2024 год, включающие описание почвенно-растительного покрова и фотофиксацию последствий воздействия тефры, лахаров и пирокластических потоков;
- публикации в международных и российских рецензируемых журналах, содержащие количественные оценки ущерба земельным ресурсам.

Методологию на этом этапе составили сравнительно-географическое описание и систематизация, позволившие выделить ключевые типы вулканических воздействий и качественно описать спектр вызываемых ими изменений.

Из первоначального перечня потенциальных индикаторов был проведен отбор показателей, удовлетворяющих следующим критериям:

1) релевантности (прямая связь с конкретным видом вулканического воздействия);
2) чувствительности (способность фиксировать изменение состояния земель при росте интенсивности воздействия);
3) измеримости (возможность количественной оценки с использованием стандартных методов ДЗЗ и геоинформационных систем [ГИС]);
4) интегративности (способность отражать кумулятивный эффект, например долгосрочное нарушение почвенно-растительного покрова);
5) практической значимости (связь с пригодностью земли для использования или ее деградацией).

Верификация чувствительности и измеримости показателей проводилась методами дистанционного анализа. Для оценки состояния растительности

использовался нормализованный относительный индекс растительности (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), рассчитываемый по данным мультиспектральной съемки. Его динамика анализировалась на временных рядах для территорий, подвергшихся пеплопадам разной мощности [11]. Для картирования ареалов распространения вулканических отложений (лавы, тефры) применялись методы контролируемой классификации с обучением на верифицированных участках по данным полевых исследований и эталонным снимкам.

Пороговые значения устанавливались с помощью количественного анализа пространственных данных в ГИС-среде. На основе ретроспективных данных и материалов авторских исследований для тестовых участков рассчитывалась доля (в процентах) площади, подвергшейся тому или иному типу воздействия, и оценивалось соотношение нарушенных и сохранившихся участков почвенно-растительного покрова.

Материалами для установления порогов послужили результаты классификации последствий конкретных извержений, данные о мощности вулканитов и наблюдаемой реакции экосистем, описанные в научной литературе, а также требования действующего законодательства в области мониторинга земель.

3 Результаты

Мониторинг состояния земель в районах активного вулканизма требует системного подхода, основанного на количественных и качественных параметрах. Для обеспечения научной строгости и практической применимости СКП выбор показателей осуществлялся согласно принципам релевантности, чувствительности, измеримости, интегративности, практической значимости и апробации.

Последствия воздействия лавовых потоков хорошо изучены и описаны во многих научных работах[2,3,4] [12]. В результате формирования потоков и плато сильно изменяется рельеф местности, что также приводит к трансформации гидросети и берегов островных территорий. Растительный покров подвержен гибели, а почвенный покров стерилизуется. Здания и объекты инфраструктуры подвергаются разрушению или погребению. Таким образом, влияние на земли, подверженные воздействию потоков лавы, можно считать бинарным: отсутствие ущерба при отсутствии лавы и полное разрушение при ее наличии. Восстановление почвенно-растительного покрова занимает продолжительное время (сотни лет) и сильно зависит (как положительно, так и отрицательно) от таких факторов, как климатические условия, высотная поясность и антропогенное вмешательство.

Пирокластические потоки в целом оказывают на земли такое же воздействие, как и лавовые потоки[5] [13]. Однако распространение потоков лавы обычно ограничено верхней частью вулканического конуса, в то время как пирокластические потоки доходят до подножия вулкана (и восстановление почвенно-растительного покрова после них может протекать несколько быстрее, составляя при благоприятных условиях десятилетия).

2 MacCaughey V. Vegetation of Hawaiian Lava Flows // Botanical Gazette. 1917. Vol. 64. Iss. 5. P. 386–416.

3 Rees J.D. Human Ecology of Paricutin Volcano, Mexico // Volcanic Activity and Human Ecology / P.D. Sheets, D.K. Grayson (eds.). New York: Academic Press, 1979. P. 249–288.

4 Aplet G.H., Hughes R.F., Vitousek P.M. Ecosystem Development on Hawaiian Lava Flows: Biomass and Species Composition // Journal of Vegetation Science. 1998. Vol. 9. Iss. 1. P. 17–26.

5 Schmincke H.-U. Volcanism. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004. 324 p.

Воздействие обломочных лавин на земли в целом имеет те же черты, однако характеризуется рядом принципиальных отличий[6,7,8]. Подобно описанным выше процессам, обломочные лавины приводят к радикальной трансформации рельефа, полному уничтожению биоты и инфраструктуры на пути их движения. Ключевое различие заключается в механизме воздействия: если лавовые потоки действуют преимущественно термически и путем погребения, а пирокластические — термически и динамически, то основным поражающим фактором обломочной лавины является ее колоссальная кинетическая энергия и масса, вызывающие не погребение, а срез и грубое перемещение всего поверхностного слоя. Основными последствиями являются: катастрофическое и мгновенное изменение рельефа (формирование новых холмов, дамб, запрудных озер), полное уничтожение почвенно-растительного покрова вместе с подстилающей коренной породой, а также масштабные преобразования гидрографической сети[9,10]. В отличие от лавовых потоков, воздействие обломочных лавин не является бинарным: их путь может быть неоднородным, оставляя зоны с частичными разрушениями по краям. Восстановление экосистем на месте схода лавины является крайне медленным процессом, поскольку начинается с первичного почвообразования на бесплодном субстрате обломков горных пород.

Распространение лахаров в большинстве случаев пространственно приурочено к речным долинам. Ущерб экосистемам, зданиям и сооружениям зависит от динамических характеристик лахаров — скорости и высоты потока, концентрации и размера частиц перемещаемого материала [14]. В верхней и средней части потока ущерб связан в основном с интенсивной боковой эрозией, которая приводит к обрушению берегов. На периферии потока или в нижней части зон отложения, где скорости значительно ниже, лахары могут покрывать здания, дороги, сельхозугодья, лесные территории слоем глинисто-каменистой массы, которая, высыхая, приобретает твердость, близкую к бетонной [15]. Отложения лахаров, как правило, тонкие по сравнению с глубиной исходных потоков. Тем не менее отмечают отложения лахаров мощностью в несколько десятков метров [16]. Русла рек, по которым сошел лахар, нестабильны, продолжительное время наблюдается активная эрозия речных долин [13].

Воздействие вулканического пепла на окружающую среду и инфраструктуру не является бинарным и носит сложный, кумулятивный и пространственно распределенный характер. Главное отличие от других вулканических опасностей заключается в масштабах распространения: даже умеренные извержения могут привести к выпадению тефры на огромных площадях, измеряемых тысячами квадратных километров, что затрагивает не только склоны вулкана, но и удаленные территории.

Пеплопад приводит к физическому повреждению растений, закислению почв и выщелачиванию токсичных элементов. Исследования в Патагонии показали, что слой пепла даже в 15 мм может вызвать полную гибель пастбищ и значительные потери в животноводстве, а последующие ливни, уплотняющие пепел, многократно усугубляют ущерб [4]. Пепловая нагрузка повышает риски повреждения крон и стволов, а в сочетании с паводками приводит к долгосрочной деградации экосистем [17]. Мощность отложений вулканического пепла влияет на темпы восстановления растительного покрова. Так, в условиях

6 Ui T., Yamamoto H., Suzuki-Kamata K. Characterization of Debris Avalanche Deposits in Japan // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1986. Vol. 29. Iss. 1-4. P. 231–243.

7 Siebert L. Large Volcanic Debris Avalanches: Characteristics of Source Areas, Deposits, and Associated Eruptions // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1984. Vol. 22. Iss. 3-4. P. 163–197.

8 Glicken H. Rockslide-Debris Avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens Volcano, Washington. Open-file Report 96-677. USGS, 1996. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://pubs.usgs.gov/of/1996/0677 (дата обращения: 09.11.2025).

9 Palmer B.A., Alloway B.V., Neall V.E. Volcanic Debris-Avalanche Deposits in New Zealand — Lithofacies Organization in Unconfined, Wet-Avalanche Flows // Sedimentation in Volcanic Settings. SEPM Special Publication. 1991. Vol. 45. P. 89–98.

10 Crandell D.R. Gigantic Debris Avalanche of Pleistocene Age from Ancestral Mount Shasta Volcano, California, and Debris-Avalanche Hazard Zonation // US Geological Survey Bulletin 1861. 1989. P. 1–32.

Кунашира (Курильские острова) после извержения вулкана Тятя слой выпавшего пепла до 20 см не оказал долговременного (спустя 10 лет) негативного эффекта на состояние растительного покрова, по данным дешифрирования космических снимков [11]. При мощности тефры более 30–40 см растительный покров восстанавливается крайне медленными темпами: сильный негативный эффект наблюдается уже более 50 лет.

Проблемы возникают из-за нагрузки на крыши зданий, загрязнения систем водоснабжения, коротких замыканий в электросетях и выхода из строя двигателей механизмов. Абразивные свойства пепла наносят ущерб дорожным покрытиям и аэродромам[11] [17]. Сроки восстановления сильно варьируются: если после прохождения лавовых потоков для этого требуются столетия, после пеплопада экосистемы и хозяйственная деятельность могут возродиться в течение нескольких лет или десятилетий. Однако интенсивность восстановления критически зависит от трех факторов: толщины тефры, химического состава (особенно содержания фтора и серы) и эффективности мероприятий по рекультивации [4].

На основе анализа механизмов воздействия была разработана СКП, представляющая собой перечень ключевых измеряемых параметров, привязанных к конкретным вулканическим процессам и характеризующих состояние земельных ресурсов. Выбор показателей осуществлялся в соответствии с принципами, изложенными в предыдущем разделе статьи. Для каждого показателя определены метод его измерения или расчета, используемые данные и единицы измерения (табл. 1).

СКП служит первичным инструментом для сбора объективных данных. Последующая интеграция и оценка этих данных по критериям, приведенным в табл. 2, позволяют определить интегральную СРНП для конкретной территории.

Таблица 1

Система контролируемых показателей для мониторинга состояния земель в районах активного вулканизма

Table 1

A system of controlled indicators for monitoring the condition of lands in areas of active volcanism

Контролируемый показатель	Связь с типом вулканического воздействия	Метод измерения
Площадь воздействия, км^2	Все типы	Контролируемая классификация мультиспектральных снимков с обучением на верифицированных участках; верификация по данным полевых исследований и эталонным снимкам
Доля нарушенного почвенно-растительного покрова, %	Все типы	$D_{наруш} = (S_{наруш} \,/\, S_{возд}) \times 100\,\%$, где $S_{наруш}$ — площадь с нарушенным покровом, выделенная на основе данных ДЗЗ
NDVI-аномалия (безразмерная)	Все типы	Анализ мультиспектральных снимков $A_{вег} = (\mathrm{NDVI}_{фона} - \mathrm{NDVI}_{возд}) \,/\, \mathrm{NDVI}_{фона}$
Мощность тефры, см	Пеплопады	Полевые замеры, модели распределения, косвенная оценка по степени снижения NDVI
Площадь полного погребения лавовыми потоками, пирокластическими отложениями или обломочными лавинами, км^2	Лавовые и пирокластические потоки, обломочные лавины	ДЗЗ, анализ полевых данных
Мощность отложений лахаров, см	Лахары	ДЗЗ, анализ полевых данных
Степень повреждения инфраструктуры, баллы (0–3)	Все типы	ДЗЗ, анализ полевых данных

11 Global Volcano Model, & IAVCEI. Handbook for Volcanic Risk Management: Prevention, Crisis Management, and Resilience / L. Oversby (ed.). Retrieved from Global Volcano Model, 2015. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://preventionweb.net/publications/view/29975 (дата обращения: 10.09.2025).

Таблица 2

Контролируемые показатели слежения за состоянием земель в районах активного вулканизма

Table 2

Controlled indicators for monitoring land conditions in areas of active volcanism

Степень развития негативного процесса	Критерии оценки данных	
	в фазе острого воздействия	в фазе долгосрочного влияния
Сильная	Фиксируются лавовые / пирокластические потоки, обломочные лавины, мощные отложения лахаров и тефры	– нарушение / погребение почвенного покрова вулканитами составляет более 70 % площади воздействия вулканического процесса; – сохраняется менее 30 % площади с фрагментарным растительным покровом; – преобладает первичная сукцессия
	Наблюдается деградация земель, вызванная погребением / уничтожением почвенно-растительного покрова более чем на 70 % площади воздействия вулканического процесса	
	Разрушение зданий и объектов инфраструктуры	
Средняя	Фиксируются зоны частичного воздействия обломочных лавин, маломощных отложений лахаров и тефры	– нарушение / погребение почвенного покрова вулканитами составляет 30–70 % площади воздействия вулканического процесса; – сохраняется 30–70 % площади с растительным покровом мозаичного характера; – преобладает вторичная сукцессия
	Ухудшено качество земель, наблюдается массовая гибель нелесной растительности на 30–70 % площади воздействия вулканического процесса	
	Повреждены отдельные конструктивные элементы зданий и сооружений	
Слабая	Фиксируются маломощные отложения лахаров и тефры	– нарушение / погребение почвенного покрова вулканитами составляет до 30 % площади воздействия вулканического процесса; – сохраняется более 70 % естественного растительного покрова
	Незначительно ухудшено качество земель. Наблюдается частичная гибель растительности на менее 30 % площади воздействия вулканического процесса	
	Нарушена работа инженерных систем	

При мониторинге земель предлагается анализировать степень повреждения инфраструктуры в результате воздействия вулканических процессов. Для этого необходимо ввести четырехбалльную шкалу:

0 — нет повреждений (инфраструктура функционирует в штатном режиме);

1 — нарушение работы инженерных систем (загрязнение систем водоснабжения, короткие замыкания в электросетях, выход из строя устройств сооружений из-за пеплопада, затопление вследствие схода лахара);

2 — повреждения отдельных конструктивных элементов (деформация несущих конструкций, обрушение кровель под нагрузкой тефры, повреждение фасадов, размыв дорожного полотна);

3 — разрушение зданий и объектов инфраструктуры (полное или частичное обрушение зданий, разрушение мостов, полное погребение дорог лавовыми / пирокластическими потоками или лахарами).

Специфика воздействия вулканических процессов на состояние земель обуславливает необходимость учета временного аспекта при проведении мониторинга состояния земель, в связи с чем предлагается выделять фазы:

– острого воздействия — непосредственно после негативного события и в течение месяца после него (оперативные съемки);

– долгосрочного влияния — спустя месяцы и (или) годы, когда фиксируются нарушение почвенного покрова, сохранность или восстановление растительного покрова в ходе периодических съемок (рис. 2).

Перспектива включения контроля вулканических процессов в систему государственного мониторинга земель[12] диктует необходимость гармонизации критериев СРНП, а именно выделения трех уровней развития негативных процессов.

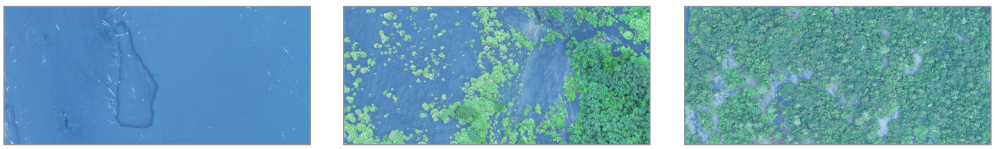
12 Об утверждении Порядка осуществления государственного мониторинга земель, за исключением земель сельскохозяйственного назначения: приказ Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 22 июля 2021 г. № П/0315. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202112100058?ysclid=mue73mkxrv916215909 (дата обращения: 20.07.2025).

Рис. 2
Выделение степени развития негативного процесса при долгосрочном влиянии от извержения вулкана на основе материалов полевых исследований и данных ДЗЗ

Fig. 2
Identification of the degree of development of a negative process with a long-term impact from a volcanic eruption based on field research materials and remote sensing data

Полевые исследования / Field research materials

Данные ДЗЗ / Remote sensing data



Таким образом, на основе проведенного анализа механизмов и последствий воздействия основных вулканических процессов на земельные ресурсы были систематизированы и формализованы ключевые диагностические признаки. Это позволило разработать комплекс критериев для выделения трех степеней развития негативного процесса.

СРНП определяется для конкретной территории на основе превышения пороговых значений ключевых показателей СКП. При наличии данных по нескольким показателям для одной территории итоговая СРНП может определяться по наихудшему значению.

Регулярный мониторинг по СКП позволяет объективно оценивать как естественное восстановление земель, так и эффективность рекультивационных мероприятий. Ключевым индикатором положительной динамики служит переход территории из более высокой СРНП в более низкую (например, из средней в слабую), что свидетельствует о восстановлении экологических функций земельных ресурсов. Таким образом обеспечивается переход от описательных оценок последствий извержений к стандартизированной системе мониторинга состояния земельных ресурсов.

4 Обсуждение

Как указано выше, предложенные СКП и шкала СРНП позволяют перейти от качественных описаний последствий извержений к их стандартизированной количественной оценке. Это значит, что земли в районах активного вулканизма рассматриваются не просто как пассивный объект воздействия, а как динамичный ресурс, требующий управления в условиях развития активного вулканизма.

Ключевым элементом предлагаемой системы являются количественные пороги, выделенные для трех степеней воздействия. Установление границы в 70 % нарушения почвенно-растительного покрова для сильной степени обусловлено данными о практически необратимой трансформации экосистем на лавовых потоках и в зонах массивных пирокластических отложений, где процессы почвообразования и сукцессии начинаются заново и длятся столетиями[13,14]. Значение 30 % для слабой степени отражает порог устойчивости экосистем, при котором сохраняется потенциал для быстрого самовосстановления, что подтверждается наблюдениями за восстановлением пастбищ после маломощных пеплопадов [4, 5]. Таким образом, предложенные критерии не являются произвольными, а опираются на эмпирически наблюдаемые рубежи, разделяющие принципиально разные траектории восстановления земель.

13 MacCaughey V. Vegetation of Hawaiian Lava Flows // Botanical Gazette. 1917. Vol. 64. Iss. 5. P. 386–416.
14 Aplet G.H., Hughes R.F., Vitousek P.M. Ecosystem Development on Hawaiian Lava Flows: Biomass and Species Composition // Journal of Vegetation Science. 1998. Vol. 9. Iss. 1. P. 17–26.

Включение в СКП такого показателя, как степень повреждения инфраструктуры, с формализованной балльной шкалой обусловлено необходимостью комплексной оценки последствий для земельных ресурсов, которые включают в себя не только природные экосистемы, но и объекты антропогенной среды. Предложенная шкала позволяет унифицировать разрозненные описательные оценки ущерба, приведя их к единому количественному виду, сопоставимому с экологическими критериями СРНП. Это создает целостную основу для экономического расчета ущерба, планирования мероприятий по восстановлению территорий и зонирования территории.

Как отмечено во введении, существующие сети мониторинга (INGV, USGS) ориентированы преимущественно на прогноз извержений. Разработанная СКП заполняет эту нишу, фокусируясь на последствиях. В отличие от точечных оценок ущерба, например, для сельского хозяйства, предлагаемая система является универсальной и применима для оценки воздействия на все категории земель. Это создает единую методологическую основу для междисциплинарного диалога вулканологов, почвоведов, экологов и специалистов по землеустройству.

Таким образом, СКП позволяет оценивать состояние земельного ресурса, а не только фиксировать сам факт вулканического процесса. Количественные критерии СРНП устраняют субъективизм в оценке масштабов ущерба и динамики восстановления. Данные мониторинга по СКП формируют основу для ведения специализированного раздела государственного мониторинга земель (ГМЗ) в вулканических регионах. Результаты мониторинга земель по установленной СКП могут лечь в основу последующего зонирования территорий, разработки эффективных стратегий планирования землепользования и рекультивации. СКП использует методы (ДЗЗ, ГИС, стандартные полевые обследования) и показатели, совместимые с международными подходами и легко интегрируемые в существующие системы сбора данных.

Сложности внедрения СКП могут быть связаны с региональной спецификой.

1. Оптимальные пороги некоторых показателей могут варьироваться в зависимости от типа вулканизма (эффузивный / эксплозивный), климата, типа почв и экосистем. Проведение региональных калибровочных исследований и установление локальных фоновых значений в рамках ГМЗ должны способствовать решению этих проблем.
2. Требуется накопление и анализ массива данных о реальных извержениях в разных условиях для статистического подтверждения и возможной корректировки порогов.
3. Необходима оценка синергетического эффекта одновременного воздействия нескольких факторов (например, пепел и газы) на конечные показатели состояния земель. Решением этой проблемы может выступить развитие интегральных индексов и математических моделей, учитывающих взаимодействие факторов.

Перспективы развития СКП связаны с ее углублением и интеграцией. Ключевыми направлениями являются:

- разработка детализированных, откалиброванных для основных вулканических регионов версий шкалы СРНП;
- создание протоколов и регламентов для включения СКП в систему ГМЗ.

5 Выводы

В ходе исследования была разработана и научно обоснована комплексная система контролируемых показателей для мониторинга состояния земель в районах активного вулканизма. Ее ядром является шкала степени развития негативного процесса с четкими количественными критериями.

Выбор показателей и их пороговых значений для СРНП базируется на анализе как механизмов воздействия вулканизма на земли, так и международного опыта мониторинга и научных данных.

Результаты мониторинга по СКП формируют основу:
- для специализированного раздела государственного мониторинга земель в вулканически активных регионах, обеспечивая объективные данные о состоянии земельного ресурса;
- последующего зонирования территорий по уровню вулканического воздействия;
- научно обоснованного планирования землепользования, установления ограничений и разработки мероприятий по восстановлению (рекультивации) нарушенных земель.

библиография

1. Freire S., Florczyk A., Pesaresi M., et al. An Improved Global Analysis of Population Distribution in Proximity to Active Volcanoes, 1975–2015 // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2019. Vol. 8. Iss. 8. P. 341. DOI:10.3390/ijgi8080341.
2. Orazi M., Martini M., Peluso R. Data Acquisition for Volcano Monitoring // Eos, Transactions American Geophysical Union. 2006. Vol. 87. Iss. 38. P. 385–392. DOI:10.1029/2006EO380002.
3. Fujii T., Yamasato H. Integrated Monitoring of Japanese Volcanoes // Volcanic Hazards, Risks and Disasters / J.F. Shroder, P. Papale (eds.). Amsterdam: Elsevier, 2015. P. 445–459.
4. Craig H., Wilson T., Stewart C., et al. Agricultural Impact Assessment and Management after Three Widespread Tephra Falls in Patagonia, South America // Natural Hazards. 2016. Vol. 82. P. 1167–1229. DOI:10.1007/s11069-016-2240-1.
5. Thompson M.A., Lindsay J.M., Wilson T.M., et al. Quantifying Risk to Agriculture from Volcanic Ashfall: A Case Study from the Bay of Plenty, New Zealand // Natural Hazards. 2017. Vol. 86. P. 31–56. DOI:10.1007/s11069-016-2672-7.
6. Petrucci C., Romoli G., Pignatelli A., et al. Volcano Activity Classification from Synergy of EO Data and Machine Learning: An Application to Mount Etna Volcano (Italy) // Discover Applied Sciences. 2025. Vol. 7. P. 680. DOI:10.1007/s42452-025-07311-8.
7. Whitty R., Pfeffer M., Ilyinskaya E., et al. Effectiveness of Low-Cost Air Quality Monitors for Identifying Volcanic SO_2 and PM Downwind from Masaya Volcano, Nicaragua // Volcanica. 2022. Vol. 5. Iss. 1. P. 33–59. DOI:10.30909/vol.05.01.3359.
8. Dzurisin D., Lisowski M., Wicks C.W. Continuing Inflation at Three Sisters Volcanic Center, Central Oregon Cascade Range, USA, from GPS, Leveling, and InSAR Observations // Bulletin of Volcanology. 2009. Vol. 71. P. 1091–1110. DOI:10.1007/s00445-009-0296-4.
9. Гришин С.Ю. Излияние лавовых потоков на Камчатке в XX и начале XXI века: масштабы и глубина изменения экосистем // Известия Русского географического общества. 2017. Т. 149, № 6. С. 43–59.
10. Romanyuk F.A., Kordyukov A.V. Vegetation Cover of the Lahar Valley on the Sarychev Peak Volcano (Matua Isl., Middle Kuril Islands) after the Eruption in 2009: Current State and Features of Succession Processes // Journal of Mountain Science. 2021. Vol. 18. P. 1762–1777. DOI:10.1007/s11629-020-6437-0.
11. Мелкий В.А., Верхотуров А.А., Братков В.В. Оценка воздействия эксплозивных извержений вулкана Тятя (о. Кунашир, Курильские острова) на растительный покров по данным дистанционного зондирования Земли // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2021. Т. 65, № 2. С. 184–193. DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-2-184-193.
12. Jenkins S.F., Day S.J., Faria B.V.E., et al. Damage from Lava Flows: Insights from the 2014–2015 Eruption of Fogo, Cape Verde // Journal of Applied Volcanology. 2017. Vol. 6. P. 6. DOI:10.1186/s13617-017-0057-6.
13. Dale V.H., Delgado-Acevedo J., MacMahon J. Effects of Modern Volcanic Eruptions on Vegetation // Volcanoes and the Environment / J. Marti, G.G.J. Ernst (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2005. P. 227–249.
14. Jenkins S.F., Phillips J.C., Price R., et al. Developing Building-Damage Scales for Lahars: Application to Merapi Volcano, Indonesia // Bulletin of Volcanology. 2015. Vol. 77. P. 75. DOI:10.1007/s00445-015-0961-8.
15. Pierson T.C., Wood N.J., Driedger C.L. Reducing Risk from Lahar Hazards: Concepts, Case Studies, and Roles for Scientists // Journal of Applied Volcanology. 2014. Vol. 3. P. 16. DOI:10.1186/s13617-014-0016-4.

16. Vallance J.W. Lahars: Origins, Behavior and Hazards // Advances in Debris-flow Science and Practice. Geoenvironmental Disaster Reduction / M. Jakob, S. McDougall, P. Santi (eds.). Cham: Springer, 2024. P. 347–382. DOI:10.1007/978-3-031-48691-3_12.
17. Dowling L., Craig H.M., McDonald N. Fragility and Damage Functions for Production Forests Exposed to Volcanic Ashfall and Flood Hazards in Aotearoa-New Zealand // Natural Hazards. 2025. Vol. 121. P. 7027–7049. DOI:10.1007/s11069-024-06998-z.

автор **Верхотуров Алексей Александрович**
ФГБУН «Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук» (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск, Россия
лаборатория островных и прибрежных электроэнергетических систем
канд. техн. наук
0000-0002-3826-7339

Поступила 11.11.2025. Принята к публикации 23.06.2026. Опубликована 30.06.2026.

UDC 528.4:504:332.3
DOI:10.30533/GiA-2026-028

CC BY

System of Controlled Indicators for Monitoring the State of Lands in Areas of Active Volcanism

Aleksey A. Vekhoturov[1]

[1] Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
ussr-91@mail.ru

citation Vekhoturov AA. System of Controlled Indicators for Monitoring the State of Lands in Areas of Active Volcanism. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying.* 2026;70(3): 84–96. DOI:10.30533/GiA-2026-028.

keywords volcanic hazard, land degradation, land monitoring, remote sensing, system of controlled indicators, degree of negative process development

abstract The problem of monitoring the consequences of volcanic activity for land resources remains underdeveloped, while existing systems are focused primarily on eruption forecasting. The aim of the study was to develop a comprehensive system of controlled indicators for assessing land conditions in areas of active volcanism. Based on a retrospective analysis of eruption impacts, remote sensing data, and fieldresearch, a system of controlled indicators was created. This system includes key quantitative metrics such as the area of impact, proportion of damaged vegetation and soil cover, normalized difference vegetation index anomaly, deposit thickness, and infrastructure damage level. A scale of the degree of development of the negative process with three grades (severe, moderate, weak) was developed based on the system of indicators. This scale uses threshold values for the disturbance of soil and vegetation cover (70 % and 30 %). The proposed system enables a transition from descriptive assessments to standardized quantitative monitoring, forming a basis for state land monitoring, land zoning, and planning restoration measures in volcanically active regions.

references

1. Freire S, Florczyk A, Pesaresi M, et al. An Improved Global Analysis of Population Distribution in Proximity to Active Volcanoes, 1975–2015. *ISPRS International Journal of Geo-Information.* 2019;8(8): 341. DOI:10.3390/ijgi8080341.
2. Orazi M, Martini M, Peluso R. Data Acquisition for Volcano Monitoring. *Eos, Transactions American Geophysical Union.* 2006;87(38): 385–392. DOI:10.1029/2006EO380002.
3. Fujii T, Yamasato H. Integrated Monitoring of Japanese Volcanoes. *Volcanic Hazards, Risks and Disasters.* Shroder JF, Papale P (eds.). Amsterdam: Elsevier; 2015: 445–459.
4. Craig H, Wilson T, Stewart C, et al. Agricultural Impact Assessment and Management after Three Widespread Tephra Falls in Patagonia, South America. *Natural Hazards.* 2016;82: 1167–1229. DOI:10.1007/s11069-016-2240-1.

5. Thompson MA, Lindsay JM, Wilson TM, et al. Quantifying Risk to Agriculture from Volcanic Ashfall: A Case Study from the Bay of Plenty, New Zealand. ***Natural Hazards.*** 2017;86: 31–56. DOI:10.1007/s11069-016-2672-7.
6. Petrucci C, Romoli G, Pignatelli A, et al. Volcano Activity Classification from Synergy of EO Data and Machine Learning: An Application to Mount Etna Volcano (Italy). ***Discover Applied Sciences.*** 2025;7: 680. DOI:10.1007/s42452-025-07311-8.
7. Whitty R, Pfeffer M, Ilyinskaya E, et al. Effectiveness of Low-Cost Air Quality Monitors for Identifying Volcanic SO_2 and PM Downwind from Masaya Volcano, Nicaragua. ***Volcanica.*** 2022;5(1): 33–59. DOI:10.30909/vol.05.01.3359.
8. Dzurisin D, Lisowski M, Wicks CW. Continuing Inflation at Three Sisters Volcanic Center, Central Oregon Cascade Range, USA, from GPS, Leveling, and InSAR Observations. ***Bulletin of Volcanology.*** 2009;71: 1091–1110. DOI:10.1007/s00445-009-0296-4.
9. Grishin SYu. Izliyanie lavovykh potokov na Kamchatke v XX i nachale XXI veka: masshtaby i glubina izmeneniya ekosistem [Lava Effusions in Kamchatka During the 20th and Early 21st Centuries: The Scale and Depth of Ecosystem Changes]. ***Bulletin of the Russian Geographical Society.*** 2017;149(6): 43–59. (In Russian).
10. Romanyuk FA, Kordyukov AV. Vegetation Cover of the Lahar Valley on the Sarychev Peak Volcano (Matua Isl., Middle Kuril Islands) after the Eruption in 2009: Current State and Features of Succession Processes. ***Journal of Mountain Science.*** 2021;18: 1762–1777. DOI:10.1007/s11629-020-6437-0.
11. Melkiy VA, Verkhoturov AA, Bratkov VV. Otsenka vozdeistviya eksplozivnykh izverzhenii vulkana Tyatya (o. Kunashir, Kuril'skie ostrova) na rastitel'nyi pokrov po dannym distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Assessment of the Impact of Explosive Eruptions of Tyatya Volcano (Kunashir Island, Kuril Islands) on Plant Cover According to Earth Remote Sensing Data]. ***Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying.*** 2021;65(2): 184–193. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-2-184-193.
12. Jenkins SF, Day SJ, Faria BVE, et al. Damage from Lava Flows: Insights from the 2014–2015 Eruption of Fogo, Cape Verde. ***Journal of Applied Volcanology.*** 2017;6: 6. DOI:10.1186/s13617-017-0057-6.
13. Dale VH, Delgado-Acevedo J, MacMahon J. Effects of Modern Volcanic Eruptions on Vegetation. ***Volcanoes and the Environment.*** Marti J, Ernst GGJ (eds.). Cambridge: Cambridge University Press; 2005: 227–249.
14. Jenkins SF, Phillips JC, Price R, et al. Developing Building-Damage Scales for Lahars: Application to Merapi Volcano, Indonesia. ***Bulletin of Volcanology.*** 2015;77: 75. DOI:10.1007/s00445-015-0961-8.
15. Pierson TC, Wood NJ, Driedger CL. Reducing Risk from Lahar Hazards: Concepts, Case Studies, and Roles for Scientists. ***Journal of Applied Volcanology.*** 2014;3: 16. DOI:10.1186/s13617-014-0016-4.
16. Vallance JW. Lahars: Origins, Behavior and Hazards. ***Advances in Debris-flow Science and Practice. Geoenvironmental Disaster Reduction.*** Jakob M., McDougall S, Santi P (eds.). Cham: Springer; 2024: 347–382. DOI:10.1007/978-3-031-48691-3_12.
17. Dowling L, Craig HM, McDonald N. Fragility and Damage Functions for Production Forests Exposed to Volcanic Ashfall and Flood Hazards in Aotearoa-New Zealand. ***Natural Hazards.*** 2025;121: 7027–7049. DOI:10.1007/s11069-024-06998-z.

author **Aleksey A. Vekhoturov**
Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
Laboratory of Island and Coastal Electric Power Systems
PhD in Engineering
0000-0002-3826-7339

Submitted: November 11, 2025. Accepted: June 23, 2026. Published: June 30, 2026.

УДК 528.4
DOI:10.30533/GiA-2026-029

CC BY

Основные положения системы интеграции пунктов геодезического разбивочного обоснования в кадастровую и землеустроительную деятельность

Н.А. Кузовлев[1]

[1] Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия
nik.kuzovlev.2018@mail.ru

цитирование Кузовлев Н.А. Основные положения системы интеграции пунктов геодезического разбивочного обоснования в кадастровую и землеустроительную деятельность // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 3. С. 97–116. DOI:10.30533/GiA-2026-029.

ключевые слова геодезическое разбивочное обоснование, опорно-межевая сеть, государственная геодезическая сеть, база данных геоинформационной системы, кадастровая деятельность, пространственные данные

аннотация Предложенная концепция направлена на обоснование возможности передачи (а также хранения и дальнейшего использования) в Государственный фонд данных, полученных в результате проведения землеустройства (ГФДЗ), и Федеральный фонд пространственных данных (ФФПД) геодезических пунктов постоянного закрепления, заложенных в ходе реализации строительных проектов, которые выполнены при участии государственного финансирования. Произведен анализ существующей схемы взаимодействия ключевых участников строительства и публично-правовой компании «Роскадастр». Выявлены проблемы, связанные с отсутствием единых стандартов передачи, контроля и хранения геодезических данных на федеральном уровне. Разработаны основные требования к формированию и ведению раздела базы данных геоинформационной системы технического заказчика со сведениями о пунктах геодезического разбивочного обоснования (ГРО). Это обеспечит систематизацию и унификацию информации о пунктах ГРО для ее последующей передачи в федеральные фонды пространственных данных. Рассмотрены основные требования к перечню тех сведений о пунктах ГРО, которые вносятся в базу данных заказчика и которые в ходе реализации системы интеграции геодезических пунктов должны будут передаваться в ГФДЗ. Определены принципы использования пунктов градостроительной и кадастровой деятельности (ГКД) при проведении кадастровых и землеустроительных работ. Выделена роль пунктов ГКД в структуре геодезических сетей РФ. Предложена стратегия передачи пунктов из ГФДЗ в ФФПД на базе портала Национальной системы пространственных данных.

1 Введение

Начиная с февраля 2022 года и по настоящее время в связи с проведением специальной военной операции повсеместно на территории РФ наблюдается глушение спутникового сигнала. Наиболее активно сигнал глобальной навигационной спутниковой сети (ГНСС) глушится в Центральном и Южном федеральных округах. Отсутствие возможности использовать ГНСС-оборудование вынуждает геодезистов-изыскателей и кадастровых инженеров прибегать к проведению геодезических измерений традиционными методами наземной геодезии. Успешное проложение ходов полигонометрии и теодолитных ходов возможно лишь при наличии достаточно большой плотности исходных геодезических пунктов государственной геодезической сети (ГГС), геодезических сетей сгущения (ГСС) или опорно-межевых сетей (ОМС) на территории выполнения работ. Как правило, в крупных городах (Москва, Санкт-Петербург, Воронеж) ведущие геодезические организации регулярно обновляют опорные геодезические сети (ОГС) 1-го и 2-го разряда, давая возможность беспрепятственно проводить геодезические работы традиционными методами, однако в малых городах, поселках и на незастроенных территориях есть только пункты ГГС, ГСС и ОМС.

Согласно актуальным исследованиям научных работников из различных регионов страны [1–6], геодезические сети сильно разрежены, а плотность геодезических пунктов гораздо меньше нормативной. Недостаточное количество пунктов ГГС и ГСС, особенно в удаленных и малонаселенных районах, вызывает трудности в геодезическом обеспечении строительства и кадастровых работ, что приводит к удорожанию геодезических работ и увеличению сроков их проведения. На данный момент региональные управления Росреестра прекратили выдачу сведений о пунктах ОМС из Государственного фонда данных, полученных в результате проведения землеустройства (ГФДЗ)[1], а использование пунктов ОМС при выполнении кадастровых работ может являться основанием для приостановления учетно-регистрационных процедур[2,3].

В то же время при строительстве крупного объекта создается геодезическая разбивочная основа, включающая геодезические пункты постоянного закрепления. Согласно требованиям действующих нормативно-технических документов, сведения о создании и координатах таких пунктов не предоставляются в федеральные фонды пространственных данных и, следовательно, недоступны широкому кругу заинтересованных лиц для последующего использования в кадастровой деятельности.

Таким образом, проблема недостаточной плотности пунктов ГГС на малозастроенной и незастроенной территории для проведения кадастровых и землеустроительных работ обуславливает необходимость разработки системы интеграции геодезических пунктов (СИГП) постоянного закрепления, созданных в процессе проведения изыскательских и строительных работ, в ГФДЗ. Преимуществами такого фонда над региональными фондами является однородность структуры данных и наличие единого аппарата управления, что упрощает бесшовную передачу сведений о геодезических пунктах в Федеральный фонд пространственных данных (ФФПД).

---

1 О недопустимости предоставления сведений о координатах пунктов ГГС из ГФДЗ: письмо Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 15 октября 2021 г. № 19-7741-АШ/21. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://base.garant.ru/403554688 (дата обращения: 21.08.2025).

2 Об утверждении формы и состава сведений межевого плана, требований к его подготовке: приказ Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 14 декабря 2021 г. № П/0592. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://base.garant.ru/403803210 (дата обращения: 21.08.2025).

3 Письмо Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 30 декабря 2021 г. № 19-01471/21. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://base.garant.ru/403387691 (дата обращения: 21.08.2025).

В условиях активного развития градостроительной и кадастровой деятельности и необходимости экономии материальных и технических средств государства возможность реализации системы интеграции геодезических пунктов, созданных в процессе проведения изыскательских и строительных работ, в ГФДЗ и ФФПД становится стратегически важной для обеспечения эффективного управления территориями и устойчивого развития страны.

2 Материалы и методы

2.1 Анализ схемы взаимодействия участников строительства при создании ГРО и передаче данных в государственные фонды пространственных данных

Для разработки основных положений СИГП выполнен анализ требований актуальных нормативно-технических документов (ГОСТ Р 55024-2012[4], СП 48.13330.2019[5], СП 126.13330.2017[6], СП 317.1325800.2017[7] и т. д.) к проектированию, созданию и сохранности пунктов ОГС и геодезического разбивочного обоснования (ГРО) при проведении строительных работ. С учетом требований к точности определения координат (высот), типу и глубине закладки центров в СИГП могут быть включены геодезические пункты постоянного закрепления, ОГС, каркасной сети, ГРО, мостового геодезического разбивочного обоснования. Предложено общее наименование для таких пунктов — *геодезические пункты для ведения градостроительной и кадастровой деятельности* (ГКД).

Схема взаимодействия основных участников СИГП при создании пунктов ГКД представлена на рис. 1. Она включает несколько этапов.

1. Технический заказчик (застройщик) выигрывает тендер на строительство или реконструкцию объекта капитального строительства или транспортной инфраструктуры с привлечением средств бюджетной системы Российской Федерации по закону 44-ФЗ «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд»[8]. В процессе реализации тендера технический заказчик заключает договор подряда со специализированной организацией на проведение изыскательских проектных работ.
2. В целях обеспечения проектных работ исходными данными специализированная организация организует или проводит инженерно-геодезические изыскания, для реализации которых необходимы исходные пункты (ГГС, в том числе ВГС, СГС). На основании федеральных законов № 431-ФЗ «О геодезии, картографии и пространственных данных и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»[9]

4 ГОСТ Р 55024-2012. Сети геодезические. Классификация. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2014. 7 с.

5 СП 48.13330.2019. Организация строительства. СНиП 12-01-2004. М.: Стандартинформ, 2022. 47 с.

6 СП 126.13330.2017. Геодезические работы в строительстве. Актуализированная редакция СНиП 3.01.03-84. М.: Стандартинформ, 2018. 53 с.

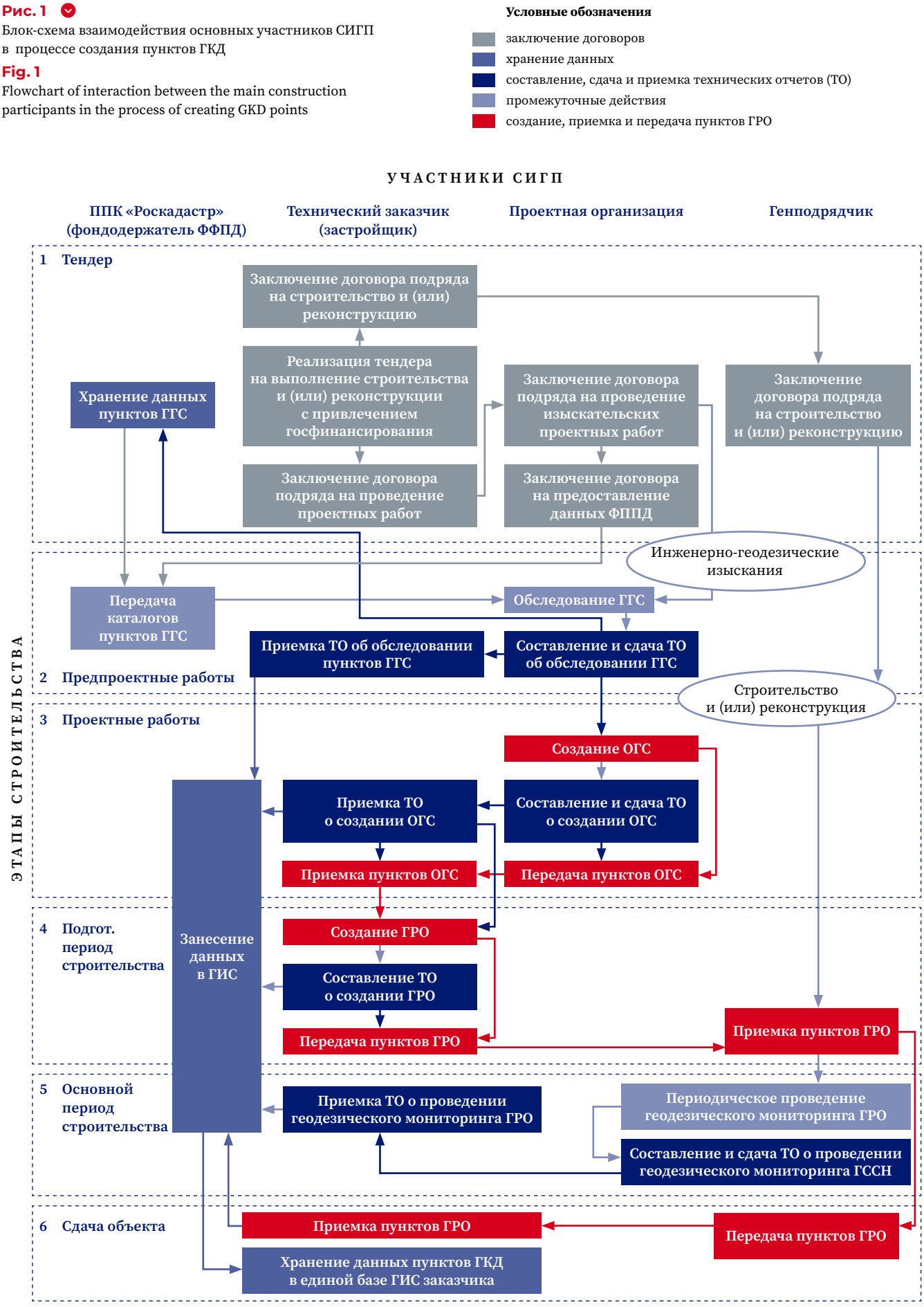
7 СП 317.1325800.2017. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. М.: Стандартинформ, 2018. 45 с.

8 О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд: Федеральный закон от 5 апреля 2013 г. № 44-ФЗ (с изм. и доп., вступ. в силу с 26 декабря 2024 г.). [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102164547 (дата обращения: 21.08.2025).

9 О геодезии, картографии и пространственных данных и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон от 30 декабря 2015 г. № 431-ФЗ (с изм. и доп., вступ. в силу с 31 июля 2025 г.). [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=102088491&backlink=1&nd=102385369 (дата обращения: 21.08.2025).

Рис. 1
Блок-схема взаимодействия основных участников СИГП в процессе создания пунктов ГКД

Fig. 1
Flowchart of interaction between the main construction participants in the process of creating GKD points



и № 448-ФЗ «О публично-правовой компании „Роскадастр“»[10] проектная (специализированная) организация заключает с ППК «Роскадастр» договор о предоставлении пространственных данных. ППК «Роскадастр» в соответствии с приложением А приказа Росреестра от 1 июля 2024 года № П/0195/24[11] представляет проектной организации выписку на существующие в районе работ исходные геодезические пункты. На основании договора перед выполнением геодезических работ на объекте проектная организация производит работы по обследованию геодезических пунктов, представленных в выписке. В соответствии с порядком, утвержденным приказом Росреестра от 27 марта 2024 года № П/0081/24[12], проектная организация предоставляет сведения об утрате или повреждении пунктов. Она также составляет и передает техническому заказчику ТО об обследовании ГГС и СГС, согласно п. 5 ГОСТ Р 59865-2022[13].

3. Инженерно-геодезические изыскания по созданию ОГС производятся в соответствии с требованиями ГОСТ Р 59865-2022 и СП 317.1325800.2017. На основании произведенных работ проектная организация передает техническому заказчику ТО о создании ОГС в соответствии с требованиями технического задания и нормативно-технических документов. Вместе с ТО проектная организация передает пункты ОГС техническому заказчику по акту передачи ОГС в соответствии с приложением Е ГОСТ Р 59865-2022.
4. Как установлено в п. 7.1 СП 48.13330.2019, технический заказчик создает на строительной площадке ГРО, включая в ТО по данным работам сведения об использованных пунктах ОГС и методиках выполняемых геодезических измерений. Полученные данные технический заказчик заносит в свою ГИС согласно п. 8.21 ГОСТ Р 59865-2022. На основании п. 5.12 СП 126.13330.2017 технический заказчик соответствующим актом (п. 5.13 СП 126.13330.2017) передает пункты ГРО генподрядчику.
5. Принятые генподрядчиком пункты ГРО, согласно п. 7.2 СП 48.13330.2019, в процессе строительства находятся под его наблюдением. Их планово-высотную стабильность генподрядчик проверяет инструментально не менее двух раз в год (в весенний и осенне-зимний периоды). Результаты контрольных измерений (мониторинга) положения пунктов ГРО предоставляются техническому заказчику в виде ТО или акта.
6. При сдаче объекта в эксплуатацию генподрядчик передает все сохранившиеся постоянные пункты ГРО техническому заказчику по акту

---

10 О публично-правовой компании «Роскадастр»: Федеральный закон от 30 декабря 2021 г. № 448-ФЗ (с изм. и доп., вступ. в силу с 31 июля 2025 г.). [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=102054672&backlink=1&&nd=602682831 (дата обращения: 21.08.2025).

11 Об установлении формы выписки о пунктах государственной геодезической сети, государственной нивелирной сети, государственной гравиметрической сети и геодезических сетей специального назначения на бумажном носителе и в электронном виде, а также требований к формату предоставления выписки о пунктах государственной геодезической сети, государственной нивелирной сети, государственной гравиметрической сети и геодезических сетей специального назначения в электронном виде: приказ Росреестра от 1 июля 2024 г. № П/0195/24. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202410100021 (дата обращения: 21.08.2025).

12 Об установлении порядка уведомления правообладателями объектов недвижимости, на которых находятся пункты государственной геодезической сети, государственной нивелирной сети, государственной гравиметрической сети, геодезических сетей специального назначения, а также лицами, выполняющими геодезические и картографические работы, публично-правовой компании, созданной в соответствии с федеральным законом от 30 декабря 2021 г. № 448-ФЗ «О публично-правовой компании „Роскадастр“», о случаях повреждения или уничтожения пунктов государственной геодезической сети, государственной нивелирной сети, государственной гравиметрической сети, геодезических сетей специального назначения: приказ Росреестра от 27 марта 2024 г. № П/0081/24. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://minjust.consultant.ru/documents/51978 (дата обращения: 21.08.2025).

13 ГОСТ Р 59865-2022. Дороги автомобильные общего пользования. Сети геодезические для проектирования и строительства. Общие требования. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 35 с.

в соответствии с приложением Е ГОСТ Р 59865-2022. Полученные данные технический заказчик должен заносить в свою ГИС в соответствии с п. 8.21 ГОСТ Р 59865-2022. При окончании строительства сведения о сохранившихся пунктах ГКД передаются во внутреннюю ГИС технического заказчика и в дальнейшем становятся недоступными для общественного пользования в интересах данного района или области.

Увеличение плотности геодезических пунктов позволит максимально эффективно реализовывать целый ряд задач градостроительства, мониторинга земель, землеустройства и кадастра (ЗиК).

1. **Проведение наземных геодезических работ традиционными методами при ведении ЗиК.** Прежде всего, увеличение плотности геодезических пунктов ведет к снижению трудовых и, как следствие, экономических затрат на производство геодезической съемки при проведении ЗиК за счет уменьшения протяженности теодолитных ходов и ходов полигонометрии при построении геодезического обоснования на объекте работ. Следствием уменьшения протяженности ходов является повышение точности наземной геодезической съемки, что способствует повышению качества материалов, сдаваемых в ГФДЗ.
2. **Выполнение и приемка комплексных кадастровых работ (ККР).** На данный момент во всех регионах РФ активно производятся ККР, т. к. именно они являются одним из самых удобных и эффективных инструментов для уточнения границ земельных участков и исправления кадастровых ошибок. Во-первых, высокая плотность сети позволит кадастровым инженерам с наименьшими трудовыми и финансовыми затратами производить геодезические измерения при проведении ККР, а во-вторых, использование близлежащих к району работ пунктов ГКД при проведении ККР повысит точность геодезической привязки массива данных, передаваемого кадастровым инженером в ФГИС «Единый государственный реестр недвижимости» (ЕГРН). Пункты ГКД также могут быть использованы региональными филиалами ППК «Роскадастр» при проведении ККР или полевой приемки (выборочного контроля) данных ККР.
3. **Проведение аэрофотосъемки при землеустройстве и мониторинге земель.** На данный момент самым распространенным и оперативным способом сбора геоинформации о состоянии сельскохозяйственных земель является аэрофотосъемка. Пункты ГКД могут быть использованы в качестве как опорных знаков при привязке аэрофотоснимков, так и опорных пунктов для установки базовой станции при определении центров фотографирования беспилотных авиационных систем. Следствием такого применения пунктов является минимизирование погрешности исходных данных при проведении аэрофотосъемки, что также ведет к повышению качества материалов, предоставляемых в ГФДЗ и в ФГИС ЕГРН.
4. **Проведение инженерно-геодезических изысканий.** Пункты ГКД пригодны для использования в качестве геодезической опоры при проведении изысканий для строительства новых и реконструкции уже имеющихся объектов недвижимости.
5. **Беспрепятственное выполнение геодезического обеспечения ЗиК, мониторинга земель и градостроительства в условиях глушения сигнала ГНСС.** В РФ наблюдается активное глушение спутникового сигнала на территории Южного и Центрального федеральных округов РФ. Невозможность использования ГНСС-оборудования вынуждает к выполнению геодезических работ традиционными методами от пунктов ГГС. На данный момент плотность пунктов ГГС значительно ниже нормативной для проведения кадастровых работ, что вызывает существенное увеличение стоимости и сроков геодезических работ. Именно высокая плотность сети пунктов ГКД в регионе обеспечит стабильное проведение ЗиК, мониторинга земель и градостроительства на территории глушения спутникового сигнала.

В связи с этим становится актуальным вопрос о разработке и выпуске нормативно-технических и правовых документов, предписывающих обязательную передачу сведений о сохранившихся постоянных пунктах ГКД в ГФДЗ.

При разработке надлежащих нормативных актов предлагается учесть разработанные автором данной статьи следующие общие требования:
- к структуре формирования и ведения раздела базы данных ГИС технического заказчика со сведениями о геодезических пунктах (ГКД);
- перечню вносимых в базу данных заказчика сведений о пунктах ГРО;
- регламенту передачи-приема пунктов ГКД в ГФДЗ;
- основным положениям правовой поддержки реализации СИГП.

2.2 Разработка общих требований к формированию и ведению раздела базы данных заказчика со сведениями о пунктах ГКД

ГИС являются критически важным инструментом в строительной отрасли, обеспечивая научно-техническую поддержку процессов планирования, мониторинга строительства и управления им на всех этапах жизненного цикла объекта. На данный момент в строительстве используются разнообразные ГИС, разработанные для задач конкретного заказчика, например:
- для государственных органов РФ — Федеральная государственная географическая информационная система «Единая цифровая платформа „Национальная система пространственных данных“» (ФГИС ЕЦП НСПД), государственная информационная система обеспечения градостроительной деятельности (ГИС ОГД) и т. д.;
- для государственных корпораций РФ — Федеральная государственная информационная система учета и контроля за обращением с отходами I и II классов опасности Росатома (ФГИС ОПВК), Программный комплекс Геоинформационная платформа ОАО «РЖД» (ПК ГИП РЖД) и т. д.;
- для частных строительных компаний — адаптированные под нужды крупных компаний международные ГИС-платформы, такие как ArcGIS или QGIS, которые применяются для управления проектами, распределения ресурсов и интеграции с технологиями информационного моделирования зданий (*англ.* Building Information Model, BIM).

Каждый из заказчиков создает свои ГИС для решения собственных производственных задач. При этом всякая база данных заказчика, входящая в ГИС, имеет индивидуальную структуру и формат. При принятии нормативных законов, предписывающих техническому заказчику передавать имеющиеся данные по пунктам ГРО в ГФДЗ, многообразие индивидуальных структур и форматов баз данных технических заказчиков не позволит осуществлять данную операцию быстро и без потери определенной части данных. В связи с этим становится актуальным вопрос разработки общих требований к структуре формирования, ведению и наполнению раздела базы данных технического заказчика со сведениями о пунктах ГРО, предназначенных для передачи в ГФДЗ.

На протяжении всего периода строительства технический заказчик оперирует базой данных ГИС, куда входит разрозненная информация о нормативной, проектной, рабочей, исполнительной и отчетной документации, касающейся постоянных пунктов ГРО.

Унификация требований к структуре формирования, ведению и наполнению раздела базы данных технического заказчика со сведениями о пунктах ГРО позволит не только упростить и ускорить процесс передачи требуемых данных в ГФДЗ, но и повысить эффективность строительства в целом, обеспечивая всех заинтересованных лиц качественной и актуальной информацией о текущем состоянии ГРО на строительной площадке.

Для того чтобы раздел базы данных технического заказчика, содержащий сведения о пунктах ГРО, позволял производить эффективный сбор, анализ, хранение и передачу данных о пунктах ГРО, должны соблюдаться следующие требования.

1. Необходимость формирования данного раздела в базе данных должна быть установлена техническим заказчиком (застройщиком) в техническом задании.

2. Раздел должен храниться в электронном виде, а его формирование следует осуществлять либо при помощи специальной программной среды управления данными (системы управления базами данных), разрабатываемой в соответствии с ГОСТ 34.602-2020[14], либо посредством совокупности текстовых, табличных, графических файлов и программных средств для управления этими файлами и контролируемого доступа к файлам данных и программным средствам.
3. Должна быть обеспечена возможность пользования данным разделом специалистами различного уровня и различных специальностей. Предоставляемая информация должна быть визуальной, обеспечивать получение итоговых документов в виде отчетных и справочных форм. По модели структурирования раздел должен быть реляционным, представляя собой множество взаимосвязанных таблиц, каждая из которых содержит информацию об объектах определенного вида.
4. При организации базы данных должны быть различимы постоянные и временные данные. К постоянным данным относятся первичные (необработанные) и расчетные (обработанные) данные, полученные после расчетов. Постоянные первичные и расчетные геодезические данные должны представляться с указанием показателей точности или неопределенности. Данные в разделе должны быть логически структурированы (систематизированы) для обеспечения возможности их поиска и обработки. Поставляемая в раздел информация должна быть подтверждена соответствующей подписью или печатью.
5. База данных должна содержать сведения о ключах перехода между применяемыми на объекте системами координат (высот) к системам координат (высот) субъектов Российской Федерации (п. 5.9 СП 126.13330.2017).

В пределах раздела должна использоваться единая система наименований, определяющая иерархию данных, необходимую при проведении процедуры их сортировки. База данных должна содержать ссылочную базу нормативной и технической документации, используемой в ходе создания и контроля стабильности ГРО.

Общая структура раздела должна включать:

- объекты, структурированные по схеме дерева;
- элементы объектов и сведения об источнике данных;
- данные элементов объектов;
- нормативную и техническую документацию;
- пользователей и уровни доступа;
- протоколы работы с разделом.

Данные об объектах должны содержать наименование и вид объекта строительства; местоположение объекта; основные технические характеристики объекта; ссылку на родительский объект.

Перечень элементов объекта, вносимых в раздел, может варьироваться в зависимости от вида и назначения строящегося (реконструируемого) объекта, однако основными элементами, необходимыми для введения в раздел, являются:

- проектная и рабочая документация (проекты организации геодезических работ, проекты производства геодезических работ, программы геотехнического мониторинга и т. д.);
- геодезическая нормативно-техническая и правовая документация (федеральные законы, государственные стандарты, своды правил и т. д.);
- договорная документация по геодезическому обеспечению объекта;
- сведения об исходных пунктах (реперах) и пунктах ОГС, созданных в ходе инженерно-геодезических изысканий;
- акты приемки-передачи результатов геодезических работ (обследование, создание, приемка, контроль пунктов ГРО и т. д.);

14 ГОСТ 34.602-2020. Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 8 с.

— ТО по работам, связанным с обследованием, созданием, приемкой и контролем стабильности пунктов ГРО.

По типу вносимые в раздел данные должны быть разделены на исходные (остаются неизменными на протяжении всего срока строительства объекта) и преобразованные (вносимые, добавляемые и редактируемые техническим заказчиком либо генподрядчиком).

Предлагается в отношении каждого внесенного в раздел пункта ГРО приводить основные сведения, регламентированные требованиями приказа Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 17 января 2024 года № П/0004/24[15]. Дополнительно к данным требованиям предложено:

— в случае проведения повторных наблюдений на пунктах ГРО новые значения координат пунктов, нормальных высот марок пунктов вносить в раздел в качестве основных сведений; ранее внесенные значения координат пунктов, нормальных высот марок пунктов переводить в подраздел дополнительных сведений;
— пунктам ГРО в случае изменения класса или высотной отметки присваивать новый индекс.

Информация о нормативной, технической, проектной и договорной документации должна содержать упорядоченные ссылки на данную документацию в ГИС с возможностью поиска и быстрого доступа к ней.

В качестве выбора основных форматов файлов, представленных в базе данных, предлагается руководствоваться таблицей 7.2 СТО 95 12019-2017[16]. В целях обеспечения интероперабельности базы данных ГИС с другими системами целесообразно использовать открытые форматы IFC, XML или API, согласно п. 7.3 СП 331.1325800.2017[17].

На данный момент наблюдается стремительное развитие НСПД. Основные положения ее создания и ведения закреплены постановлением Правительства РФ от 7 июня 2022 года № 1040[18]. Согласно п. 6 данного постановления, НСПД представляет собой федеральную государственную географическую информационную систему, объединяющую широкий спектр ГИС органов государственной власти и органов местного самоуправления.

ГФДЗ как источник пространственных данных может быть интегрирован в НСПД, обеспечивая централизованное хранение и доступ к сведениям о пунктах ГКД. Хранение сведений о пунктах ГКД в НСПД, в соответствии с установленной структурой базы данных, позволит при необходимости беспрепятственно интегрировать их в ГИС ФППД.

Таким образом, НСПД является связующей платформой для структур и лиц, участвующих в реализации СИГП, в связи с чем, по мнению автора, именно на базе НСПД потенциально перспективна интеграция пунктов ГРО в кадастровую деятельность.

---

15 Об установлении порядка ведения реестра пунктов государственной геодезической сети, государственной нивелирной сети, государственной гравиметрической сети, геодезических сетей специального назначения, в том числе порядка внесения в него сведений о пунктах государственной геодезической сети, государственной нивелирной сети, государственной гравиметрической сети, геодезических сетей специального назначения и об их состоянии, особенностей учета таких пунктов: приказ Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 17 января 2024 г. № П/0004/24. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202403260005 (дата обращения: 01.09.2025).

16 СТО 95 12019-2017. Инженерные изыскания при строительстве атомной станции. База данных. Общие требования к формированию, структуре, управлению. М.: Росатом, 2017. 57 с.

17 СП 331.1325800.2017. Информационное моделирование в строительстве. Правила обмена между информационными моделями объектов и моделями, используемыми в программных комплексах. М.: Стандартинформ, 2018. 21 с.

18 О федеральной государственной географической информационной системе «Единая цифровая платформа „Национальная система пространственных данных“»: постановление Правительства РФ от 7 июня 2022 г. № 1040 (с изм. и доп., вступ. в силу с 30 мая 2025 г.). [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&link_id=6&nd=603104103 (дата обращения: 21.08.2025).

3 Результаты и обсуждение

3.1 Разработка общего регламента передачи-приема, модернизации и использования пунктов ГКД

Рис. 2
Принципиальная блок-схема интеграции данных пунктов ГКД из базы данных технического заказчика в ФФПД

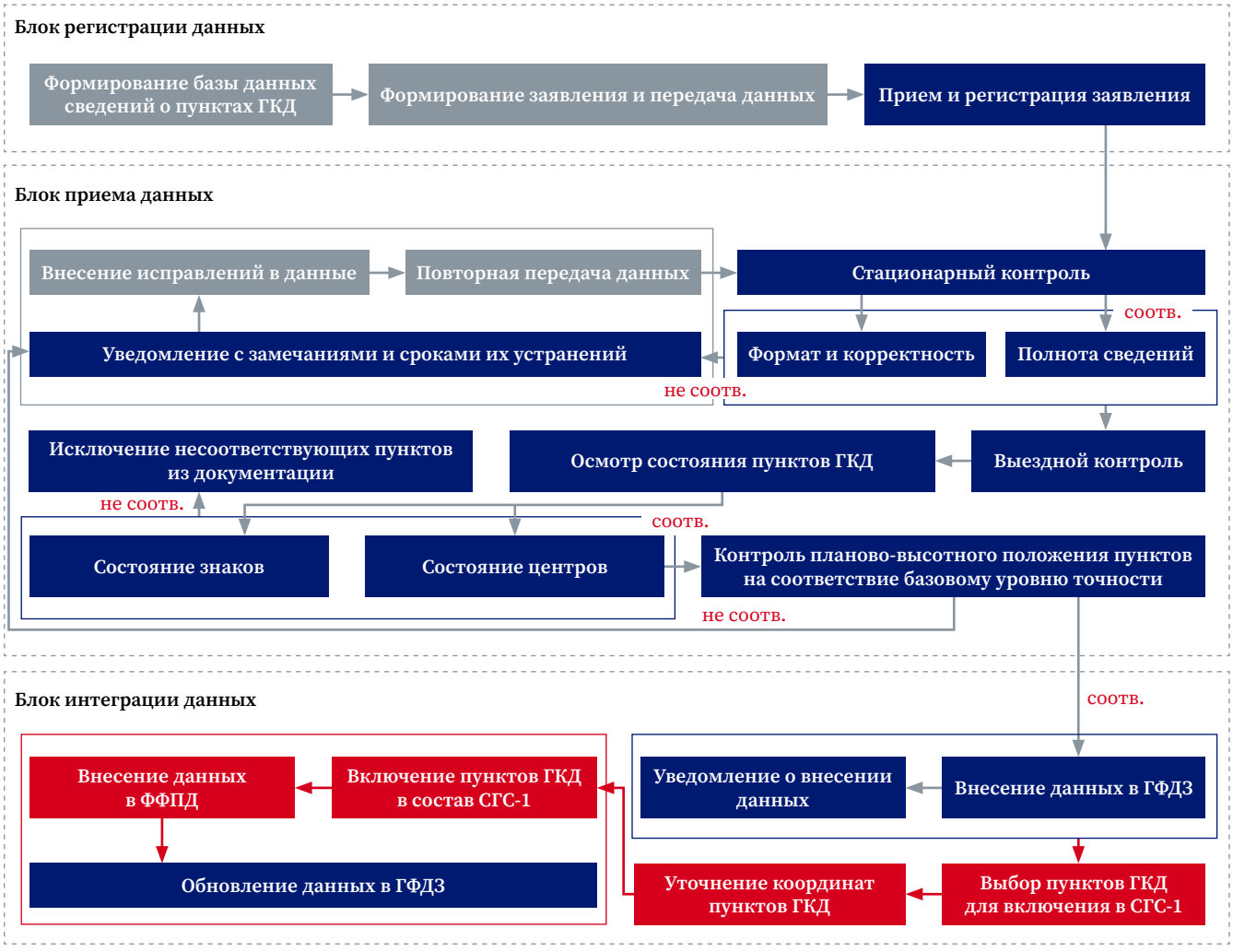
Fig. 2
Basic flowchart of integration of GKD points from the technical customer's database into the FFPD

На рис. 2 представлена концептуальная модель системы интеграции пунктов ГКД в ФФПД.

На основании раздела базы данных, посвященной пунктам ГРО, исполнитель (технический заказчик) формирует заявление и передает данные о сохранившихся (минимум трех) пунктах ГКД в ГФДЗ, находящихся в ведении регионального филиала ППК «Роскадастр». В фонд передаются исключительно сведения о пунктах постоянного закрепления.

Региональный филиал ППК «Роскадастр» выполняет прием и регистрацию заявления. Далее филиал производит входной (камеральный) контроль принятых данных на соответствие установленным образцам данных и на наличие полноты предоставленных сведений о передаваемых пунктах ГРО. Данные, не соответствующие требованиям нормативно-технических документов по результатам входного контроля, внесению в ГФДЗ не подлежат. Филиал возвращает полученные материалы исполнителю с уведомлением о замечаниях и сроках их устранений либо направляет рекламацию, оформленную в установленном порядке.

В случае соответствия данных требованиям оформления и полноты возможны два варианта следующего этапа СИГП.



1. Филиал выполняет выездной полевой контроль пунктов, который делится на два этапа: визуальный и инструментальный. Визуальный контроль предусматривает качественную оценку состояния центров, марок и внешнего оформления пунктов в 100-процентном объеме. В случае соответствия заявленным в отчетной документации характеристикам выполняется частичный инструментальный контроль в объеме не менее 10 %, при этом на каждом объекте должно быть проконтролировано минимум три пункта. Контрольные измерения, согласно разделу 7 СП 126.13330.2017, должны выполняться с точностью не ниже, чем при создании (определении плановых координат и абсолютных высот) пунктов ГРО и по возможности от одних и тех же исходных пунктов. В случае, если по результатам контрольных измерений переданные данные не соответствуют заявленной в ПОС точности, использованию в ГФДЗ они не подлежат. Филиал возвращает полученные материалы исполнителю с уведомлением о замечаниях и сроках их устранений либо направляет рекламацию, оформленную в установленном порядке. При соответствия пунктов заявленным точностным характеристикам, соответствующим базовым для ГФДЗ, этап приемки пунктов считается законченным и участие службы технического заказчика в цикле жизни пунктов прекращается. Данный вариант требует дополнительного госфинансирования на выполнение полевой приемки пунктов.
2. Определение плановых координат в местной системе координат (МСК) и отметок в Балтийской системе абсолютных высот на пунктах ГКД производится в соответствии с требованиями актуальных нормативно-технических документов[19,20,21], обеспечивающими точность определения пунктов не хуже 1-го разряда в плане и IV класса по высоте, что удовлетворяет требованиям к геодезической опоре при решении задач кадастра и землеустройства. Конечной инстанцией в строительном процессе в отношении пунктов ГКД на данный момент является технический заказчик, принимающий данные пункты соответствующими актами (п. 5.13 СП 126.13330.2017) у генподрядчика. В связи с этим филиал ограничивается камеральным контролем материалов, а вся ответственность за несоответствие плановых координат и высот пунктов ГКД заявленным точностям ложится на технического заказчика, передающего пункты в ГФДЗ. В случае успешного прохождения камерального контроля этап приемки пунктов считается законченным, а участие службы технического заказчика в цикле жизни пунктов прекращается.

Филиал вносит имеющиеся данные о пунктах в ГФДЗ и направляет техническому заказчику уведомление об этом. Учитывая, что передаваемые в ГФДЗ пункты ГРО фрагментарно расположены по району (области) и могут иметь различную точность, в ГФДЗ они вносятся с пометкой о том, что не прошли совместного уравнивания сети ГКД по району (области).

Повторные определения координат пунктов, входящих в ГФДЗ региона, и их совместное уравнивание должны планироваться и выполняться в необходимом объеме и с требуемой точностью с цикличностью раз в 10 лет. В зависимости от местных условий совместные измерения по пунктам ГКД выполняются как спутниковыми, так и классическими геодезическими методами, обеспечивающими точность уравненных координат и высот пунктов ГКД не хуже 1-го разряда в плане и IV класса по высоте.

По мнению автора, второй ступенью развития СИГП может быть передача пунктов представителями региональных филиалов ППК «Роскадастр» из ГФДЗ

19 ГОСТ Р 59865-2022. Дороги автомобильные общего пользования. Сети геодезические для проектирования и строительства. Общие требования. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 35 с.

20 СП 317.1325800.2017. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. М.: Стандартинформ, 2018. 45 с.

21 СП 126.13330.2017. Геодезические работы в строительстве. Актуализированная редакция СНиП 3.01.03-84. М.: Стандартинформ, 2018. 53 с.

специалистам из головного офиса ППК «Роскадастр» в ФФПД. Приемка пунктов может быть осуществлена в ходе проведения работ по созданию СГС-1.

На данный момент актуальным нормативно-техническим документом, регламентирующим основные требования к созданию СГС-1, является ГОСТ Р 57373-2016[22]. Согласно актуальной строительной нормативно-технической документации[23,24], пункты ГКД постоянного закрепления соответствуют требованиям п. 4.2 и 4.3 ГОСТ Р 57373-2016 к местоположению и закреплению пунктов СГС-1. В свою очередь, в ходе проведения работ по включению пунктов ГКД в состав СГС-1 ППК «Роскадастр» обеспечит соответствие требований к характеристикам, измерительной аппаратуре, методам измерений и документации пунктов (п. 4.1, 4.4, 4.5 и 4.6 ГОСТ Р 57373-2016 соответственно). По мнению автора, приоритетными для включения в СГС-1 являются пункты ГКД с конструкцией принудительного центрирования (п. 4.3.4 ГОСТ Р 57373-2016). Как правило, таковыми являются пункты мостового геодезического разбивочного обоснования, создаваемые в ходе строительства мостов, тоннелей, экодуков и транспортных высокоуровневых развязок.

Таким образом, после проведения наблюдений и совместного уравнивания сети задействованные в наблюдениях пункты ГКД будут переведены в состав СГС-1, а обновленные сведения о них будут внесены в ФФПД и реестр пунктов ГГС.

В случае выделения отдельного типа пунктов ГКД в структуре ГГС также возможна реализация дополнительного уровня точности в рамках структуры пунктов ГКД. Общие тенденции к переопределению пунктов геодезических сетей ППК «Роскадастр» несут положительные результаты в виде улучшения сходимости смежных пунктов и уменьшения СКП координат пунктов в МСК относительно исходных пунктов ГГС. Согласно данным исследования, имеющаяся точность пунктов ГКД будет не хуже точности пунктов ГСС 1-го разряда в плане и IV класса по высоте, которой на момент внесения сведений о пунктах в ГФДЗ будет достаточно для решения широкого спектра научно-технических задач кадастра и землеустройства. Уточнение (переопределение) координат пунктов ГКД позволит повысить их точность до более высокого класса, что расширит объем решаемых задач. Повышение точности определения координат положения пунктов ГКД в МСК является необходимостью для решения задач кадастра будущего — трехмерного кадастра.

Обобщая результаты отечественных исследований [7–11], можно выделить следующую нормативно рассчитанную СКП взаимного положения пунктов предлагаемой современной альтернативы ОМС — 1,2 см для плановых координат и высот. На основании актуальных работ в области трехмерного кадастра и анализа современных требований к точностной составляющей при создании геодезических сетей разработана двухэтапная структура пунктов ГКД как отдельного класса пунктов ГССН. Была создана схема поддержания и развития пунктов ГКД как отдельной сети пунктов в структуре ГГС (рис. 3).

Были определены также характеристики пунктов ГКД-1 (1-го разряда точности) и ГКД-4 (4-го класса точности) (табл. 1).

Первый этап является базовым и включает в себя приемку пунктов ГКД ППК «Роскадастр» после контрольных наблюдений. Точностные характеристики таких пунктов сразу после внесения в реестр ГФДЗ будут обеспечивать решение задач двухмерного кадастра и производственных задач землеустройства и мониторинга земель технической точности. Выбранные пункты будут определены как пункты ГКД-1.

---

22 ГОСТ Р 57373-2016. Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических работ. Пункты спутниковой геодезической сети 1 класса (СГС-1). Технические условия. М.: Стандартинформ, 2017. 7 с.

23 СП 126.13330.2017. Геодезические работы в строительстве. Актуализированная редакция СНиП 3.01.03-84. М.: Стандартинформ, 2018. 53 с.

24 СП 317.1325800.2017. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. М.: Стандартинформ, 2018. 45 с.

Таблица 1
Этапы модернизации пунктов ГКД в ГФДЗ

Table 1
Stages of modernization of GKD points in GFDZ

Этап	Методика наблюдений		Точностные характеристики ГКД			
			СКП взаимного положения смежных пунктов, мм		СКП определения пунктов относительно исходных пунктов, мм	
	X, Y	*H*	*X, Y*	*H*	*X, Y*	*H*
Базовый (ГКД-1)	Полигонометрия, триангуляция, трилатерация 1-го разряда, спутниковые определения	Нивелирование IV класса, спутниковые определения	30	25–30	50	30
Уточненный (ГКД-4)	Полигонометрия, триангуляция, трилатерация 4-го класса, спутниковые определения	Нивелирование II–III классов, спутниковые определения	10–20	10–20	20–30	20–30

Рис. 3
Принцип развития пунктов ГКД в пределах ГФДЗ

Fig. 3
The principle of developing GKD points within the GFDZ

Условные обозначения
- этапы
- задачи
- тип наблюдений
- дополнительная выгода реализации этапа

Второй этап подразумевает уточнение и переопределение координат пунктов ГКД путем проведения дополнительных спутниковых наблюдений либо проложения ходов полигонометрии 4-го класса. Согласно анализу нормативно-технических документов, СКП взаимного положения смежных пунктов составит до 2 см в плане и по высоте, а СКП определения координат и высот пунктов ГКД относительно исходных пунктов не будет превышать 3 см. Пункты ГКД-4 позволят решать задачи трехмерного кадастра будущего, землеустройства и мониторинга земель повышенной точности.

Если при первом этапе внедрения пунктов ГКД-1 в ГФДЗ выполняются только контрольные наблюдения при приемке пунктов, то модернизация пунктов ГКД-1 в ГКД-4 может быть произведена ППК «Роскадастр» в двух видах: при проведении оперативных либо запланированных наблюдений. Вид оперативных наблюдений подразумевает проведение работ по уточнению координат пунктов ГКД сразу после приемки пунктов от службы заказчика. Запланированные наблюдения означают уточнение координат пунктов ГКД в соответствии с намеченным ППК «Роскадастр» графиком работ по обследованию и переуточнению геодезических сетей. Фактически пункты ГКД при выделении их в отдельную сеть структуры ГГС будут являться современной альтернативой ОМС.

Возможная роль пунктов ГКД в современной структуре геодезических сетей РФ и принцип их интеграции в нее отображены на рис. 4. На схеме отмечена концепция модернизации пунктов ГКД в пределах ГФДЗ (из ГКД-1 в ГКД-4) и предложен перевод пунктов ГКД из ГФДЗ в ФФПД путем выборочного включения данных пунктов в СГС-1.

Рис. 4
Схема интеграции пунктов ГКД в современную структуру геодезических сетей РФ

Fig. 4
Scheme for integrating GKD points into the modern structure of the Russian Federation's geodetic networks

3.2 Правовая поддержка реализации СИГП

Для реализации СИГП необходимы разработка и утверждение нормативно-правовых документов, обязующих технического заказчика передавать пункты ГКД в ГФДЗ в случае проведения строительства с привлечением средств бюджетной системы РФ, а региональные филиалы ППК «Роскадастр» — переформировывать ГФДЗ, добавляя раздел базы данных пунктов ГКД; принимать у заказчика пункты ГКД и вносить сведения о них в ГФДЗ; поддерживать раздел базы данных пунктов ГКД в ГФДЗ в актуальном состоянии; сдавать (а головному офису ППК «Роскадастр» — принимать) пункты ГКД в ходе проведения работ по созданию СГС-1.

Требуются также разработка и утверждение нормативно-правового документа, определяющего статус пунктов ГКД и регламентирующего возможность их использования в целях проведения кадастровых и землеустроительных работ на момент нахождения сведений о пунктах в ГФДЗ. Должен быть утвержден процесс возможности модернизации пунктов ГКД (из ГКД-1 в ГКД-4) на период хранения сведений о них в ГФДЗ. Общая схема правовой поддержки СИГП представлена на рис. 5.

Особое внимание следует уделить тому, что концепция реализации СИГП актуальна именно для пунктов ГКД, создаваемых с привлечением средств бюджетной системы Российской Федерации (по закону 44-ФЗ), за исключением объектов, создаваемых в интересах обороны и безопасности государства.

Необходимость развития информационной основы градостроительства побудила Правительство РФ 5 марта 2021 года принять постановление № 331[25],

25 Об установлении случаев, при которых застройщиком, техническим заказчиком, лицом, обеспечивающим или осуществляющим подготовку обоснования инвестиций, и (или) лицом, ответственным за эксплуатацию объекта капитального строительства, обеспечиваются формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства: постановление Правительства РФ от 5 марта 2021 г. № 331 (с изм. и доп., вступ. в силу с 20 декабря 2022 г.). [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://government.ru/docs/all/133174/ (дата обращения: 21.08.2025).

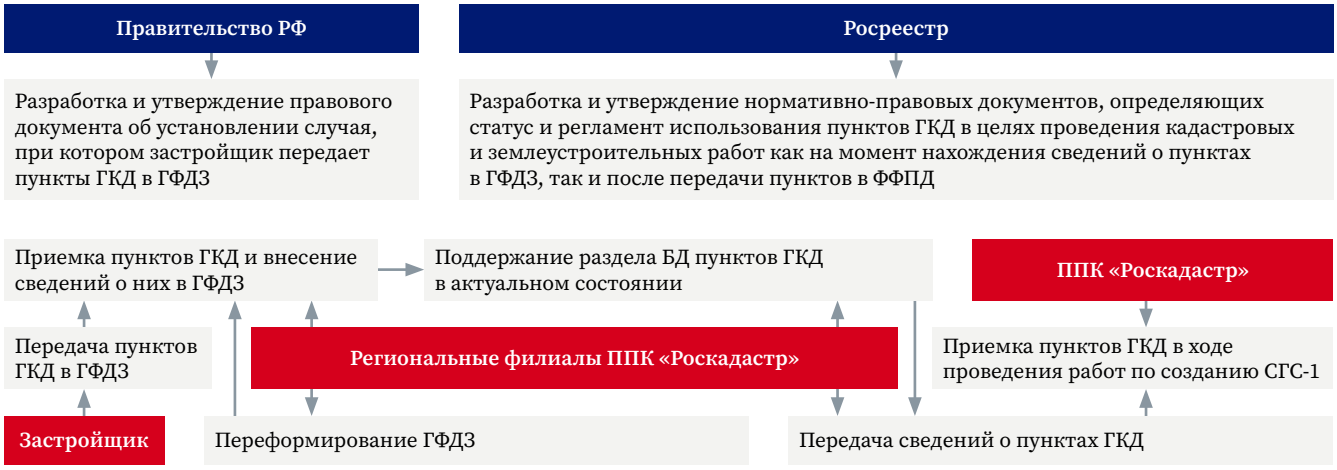


Рис. 5
Схема правовой поддержки СИГП

Fig. 5
Legal support scheme for the SIGP

обязующее подрядчиков выполнять проектирование всех объектов капитального строительства государственного заказа после 1 января 2022 года с применением BIM-технологий, что потенциально может являться будущей основой для трехмерного кадастра [7, 8, 12, 13]. Аналогичным правовым документом, определяющим требование передачи геодезических пунктов в ГФДЗ техническим заказчиком (застройщиком), может быть правовой документ об установлении случая, при котором застройщик, технический заказчик, лицо, обеспечивающее или осуществляющее подготовку обоснования инвестиций, и (или) лицо, ответственное за эксплуатацию объекта капитального строительства, обеспечивает передачу пунктов ГКД в ГФДЗ. Следует отметить, что интеграция в ГФДЗ ранее созданных пунктов является нецелесообразной из-за крайней сложности разработки правовых механизмов, обеспечивающих дальнейшую реализацию этого действия.

Один из предложенных автором вариантов приемки пунктов ГФДЗ включает в себя полевой контроль пунктов филиалом, требующий дополнительного госфинансирования. В качестве компенсации средств, затраченных на приемку пунктов, автор предполагает возможным извлечение прибыли из предоставления выписок на пункты ГКД. На данный момент все сведения, хранящиеся в ГФДЗ, предоставляются физическим и юридическим лицам бесплатно, однако в рамках реализации проекта СИГП возможен выпуск правового документа, регламентирующего предоставление выписок на пункты ГФДЗ за плату аналогично с предоставлением из ФФПД выписок на пункты ГГС. Параллельно с техническими и правовыми вопросами реализации СИГП необходимо углубленное решение вопроса экономического обоснования и апробации данного проекта.

4 Выводы

На основании проведенных исследований, направленных на разработку СИГП, можно сделать следующие выводы:

1. Результаты проведенного сравнительного анализа нормативно-технической документации и требований ППК «Роскадастр» к геодезическим сетям подтверждают техническую и информационную совместимость данных, получаемых при создании ГРО в строительстве, с требованиями к ведению ФФПД. Установлено, что точностные характеристики пунктов ГРО удовлетворяют потребностям кадастрового учета, землеустройства и мониторинга земель.
2. Разработана принципиально новая технологическая схема взаимодействия участников инвестиционно-строительного процесса, регламентирующая передачу сведений о пунктах ГКД застройщиком в государственные фонды пространственных данных. Такой алгоритм позволяет ликвидировать существующий разрыв в жизненном цикле геодезических

данных о пунктах ГРО долговременного закрепления после ввода объекта в эксплуатацию.

3. Выделены требования к структуре и составу специализированной базы данных ГИС заказчика. Предложенный перечень атрибутивных данных и форматов обеспечивает автоматизацию процесса формирования отчетной документации для передачи данных пунктов в фонды пространственных данных без дополнительных затрат бюджетных средств на создание пунктов.
4. Разработана методика формирования банка геопространственных данных геодезического обоснования для землеустройства и кадастров. Определена роль пунктов ГКД в структуре геодезических сетей РФ и создана общая технологическая схема внедрения пунктов ГКД в государственные фонды пространственных данных и кадастровую деятельность. Обоснована возможность последующего выборочного включения пунктов ГКД в состав СГС-1.
5. Определены необходимые направления совершенствования нормативно-правовой базы. Это обеспечит многофункциональное использование результатов инженерно-геодезических изысканий и значительную экономию государственных средств, расходуемых на поддержание и развитие геодезической сети РФ.

Интеграция геодезических пунктов, созданных в ходе градостроительной деятельности, в кадастровую систему является важным шагом к совершенствованию структуры управления пространственными данными в области геодезии, кадастра и строительной отрасли. Приведенная система интеграции геодезических пунктов разных строительных организаций предусматривает структурированный подход к решению проблемы недостаточной плотности пунктов геодезической сети на территории РФ путем создания унифицированной базы данных в ГИС технического заказчика и установления четких правовых требований к передаче информации в ГФДЗ. Таким образом, создаются условия:

- для дальнейшего использования пунктов ГКД и повышения эффективности проведения ЗиК;
- экономии государственных средств, выделяемых на поддержание ГГС в рабочем состоянии;
- повышения в перспективе точности определения координат пунктов ГКД для их использования в передовых сферах, таких как трехмерный кадастр, что особенно актуально в условиях высокого темпа роста урбанизированных территорий [7, 8, 14, 15].

Стремительно развивающийся портал НСПД потенциально может служить платформой для реализации разработанной СИГП. Внедрение системы потребует совместных усилий всех участников строительного процесса и создания надежной нормативно-технической базы. Такой подход не только повысит эффективность взаимодействия заинтересованных сторон, но и внесет значительный вклад в развитие НСПД.

благодарности

Автор выражает признательность за ценные наставления при подготовке статьи своему научному руководителю — кандидату технических наук, профессору кафедры геодезии и геоинформатики Государственного университета по землеустройству Альберту Гамзатовичу Юнусову — и кандидату технических наук, доценту кафедры геодезии и геоинформатики Государственного университета по землеустройству Игорю Александровичу Назарову. Автор также благодарен начальнику Управления обеспечения хранения федерального фонда пространственных данных ППК «Роскадастр» Евгению Вячеславовичу Надеждину за плодотворное обсуждение и конструктивные замечания, которые помогли значительно улучшить практическую ценность работы.

библиография

1. Афонин К.Ф., Кинжигужинов С.М., Дрозд А.С. Анализ состояния государственной геодезической сети Республики Казахстан с учетом перспектив ее развития // Вестник СГУГиТ. 2021. Т. 26, № 1. С. 6–15. DOI:10.33764/2411-1759-2021-26-1-6-15.
2. Гатагонов А.З., Габачиева А.З., Дудиева Д.С. и др. Изучение состояния пунктов государственной геодезической сети в РСО-Алания (на примере геоточки

«Подлесный» Пригородного района) // Аграрная наука на Севере — сельскому хозяйству: сборник материалов VI Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). Киров: МЦИТО, 2024. С. 39–42. DOI:10.24412/cl-37231-2024-1-39-42.
3. Пех К.А., Пех А.А., Хугаева Л.М. Проблема уничтожения пунктов государственной геодезической сети в Алагирском районе РСО-Алания в 2022 году и способы ее решения // Нефтегазовое дело, техносферная безопасность, рациональное природопользование: современные реалии: сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 50-летию ДГТУ. Махачкала: ДГТУ, 2023. С. 173–176.
4. Смирнова Е.К., Заварин Д.А., Лахтионова А.В. и др. Опорная межевая сеть Вытегорского района Вологодской области // Московский экономический журнал. 2022. Т. 7, № 1. С. 27–38. DOI:10.55186/2413046X_2022_7_1_22.
5. Толстухин А.И., Ямщикова К.А. Анализ плотности геодезических сетей Медведевского района Республики Марий Эл // Науки о Земле: от теории к практике (Арчиковские чтения — 2020): материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Чебоксары: Среда, 2020. С. 388–391.
6. Кузовлев Н.А. Анализ состояния и тенденций развития геодезических сетей в России и за рубежом // Актуальные проблемы геодезии, картографии, геоинформатики и кадастра: материалы IX Всероссийской научно-практической конференции. Уфа: УУНиТ, 2025. С. 91–97.
7. Аврунев Е.И., Гиниятов А.И. Некоторые аспекты создания геодезического обеспечения трехмерного кадастра недвижимости // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Международный научный конгресс: сборник материалов в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2020. Т. 3. С. 30–35. DOI:10.33764/2618-981X-2020-3-2-30-35.
8. Аврунев Е.И., Гиниятов А.И. Технологическая схема создания геодезического обеспечения для целей трехмерного кадастра недвижимости // Интерэкспо Гео-Сибирь. XVIII Международный научный конгресс: сборник материалов в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2022. Т. 3. С. 49–55. DOI:10.33764/2618-981X-2022-3-49-55.
9. Аврунев Е.И., Хорошилов В.С., Метелева М.В. Исследование структуры геодезического обоснования для обеспечения кадастровой деятельности в территориальном образовании // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2015. № S5. С. 82–86.
10. Аврунев Е.И., Метелева М.В. О совершенствовании системы координатного обеспечения государственного кадастра недвижимости // Вестник СГУГиТ. 2014. Т. 25, № 1. С. 60–66.
11. Метелева М.В. Разработка и исследование методики координатного обеспечения кадастровой деятельности в территориальных образованиях: дис. … канд. техн. наук. Новосибирск, 2015. 150 с.
12. Костеша В.А., Хромов А.В. Применение сетей дифференциальных геодезических станций для обеспечения ЕГРН и ГИС автомобильных дорог пространственными данными // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2020. Т. 64, № 3. С. 277–288. DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-3-277-288.
13. Тарарин А.М., Сейтвелиева А.С. Анализ лучших мировых практик развития 3D-кадастра с использованием цифровых информационных моделей и их имплементации в России // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 2. С. 108–123. DOI:10.30533/GiA-2025-017.
14. Lemmen C., Oosterom P., Bennett R. The Land Administration Domain Model // Land Use Policy. 2015. Vol. 49. P. 535–545. DOI:10.1016/j.landusepol.2015.01.014.
15. Valstad T. Developments of the 3D Cadastre in Norway // Shaping the Changes. XXIII FIG Congress 2006. Munich: FIG, 2006. P. 1–12.

автор **Кузовлев Никита Александрович**
ФГБОУ ВО «Государственный университет по землеустройству» (ГУЗ), Москва, Россия
кафедра геодезии и геоинформатики, факультет геоматики и пространственного развития
0009-0009-3028-2583

Поступила 16.09.2025. Принята к публикации 23.06.2026. Опубликована 30.06.2026.

UDC 528.4
DOI:10.30533/GiA-2026-029

CC BY

Basic Provisions of the System for Integrating Geodetic Survey Points into Cadastral and Land Management Activities

Nikita A. Kuzovlev[1]

[1] State University of Land Use Planning, Moscow, Russia
nik.kuzovlev.2018@mail.ru

citation Kuzovlev NA. Basic Provisions of the System for Integrating Geodetic Survey Points into Cadastral and Land Management Activities. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying.* 2026;70(3): 97–116. DOI:10.30533/GiA-2026-029.

keywords geodetic layout foundation, control and boundary survey network, state geodetic network, geoinformation system database, cadastral activities, spatial data

abstract The proposed concept aims to substantiate the feasibility of transferring, storing, and subsequently using permanent geodetic survey points established during construction projects funded by the state in the State Fund of Land Management Data (GFDZ) and the Federal Fund of Spatial Data (FFPD). An analysis of the existing interaction framework between key construction participants and the public-law company Roscadastre was conducted. Issues related to the lack of unified standards outlining specific requirements for the procedure and technology for transferring, monitoring, and storing geodetic data at the federal level were identified. Basic requirements for the structure of the formation and management of the database section of the technical customer's geographic information system containing information on geodetic survey points (GRO) were developed. These requirements will ensure the systematization and standardization of GSP information for subsequent transfer of this data to federal spatial data funds. The paper proposes key requirements for the list of data entered into the customer's database regarding GRO points, which will be transferred to the GFDZ during the implementation of the Geodetic Point Integration System. The principles for using GFDZ points in cadastral and land management work are defined. The role of GFDZ points in the structure of Russian geodetic networks is highlighted. A strategy for transferring points from the GFDZ to the FFPD using the National Spatial Data System portal is proposed.

acknowledgements The author expresses his gratitude to his supervisor, PhD in Engineering, Professor of the Department of Geodesy and Geoinformatics at the State University of Land Use Planning, Albert Gamzatovich Yunusov, and PhD in Engineering, Associate Professor

of the Department of Geodesy and Geoinformatics at the State University of Land Use Planning, Igor Alexandrovich Nazarov, for their valuable guidance in the preparation of this article. The author also thanks Evgeny Vyacheslavovich Nadezhdin, Head of the Department of Storage of the Federal Spatial Data Fund at Roskadastr, for his fruitful discussions and constructive feedback, which have significantly improved the practical value of the work.

references

1. Afonin KF, Kinzhiguzhinov SM, Drozd AS. Analiz sostoyaniya gosudarstvennoi geodezicheskoi seti Respubliki Kazakhstan s uchetom perspektiv ee razvitiya [Analysis of the State Geodetic Network of the Republic of Kazakhstan Taking into Account the Development Trends]. ***Vestnik SSUGT.*** 2021;26(1): 6–15. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2021-26-1-6-15.
2. Gatagonov AZ, Gabachieva AZ, Dudieva DS, et al. Izuchenie sostoyaniya punktov gosudarstvennoi geodezicheskoi seti v RSO-Alaniya (na primere geotochki "Podlesnyi" Prigorodnogo raiona) [Study of the Condition of Stations of the State Geodetic Network in the Republic of North Ossetia Alania (Using the Example of the "Podlesny" Geotopoint in the Suburban District)]. ***Agricultural Science in the North – for Agriculture: Proceedings of the VI All Russian scientific and practical conference (with international participation).*** Kirov: ICITE Publ; 2024: 39–42. (In Russian). DOI:10.24412/cl-37231-2024-1-39-42.
3. Pekh KA, Pekh AA, Khugaeva LM. Problema unichtozheniya punktov gosudarstvennoi geodezicheskoi seti v Alagirskom raione RSO-Alaniya v 2022 godu i sposoby ee resheniya [The Problem of Destroying Points of the State Geodetic Network in the Alagir Region of the Republic of North Ossetia Alania in 2022 and Ways to Solve It]. ***Oil and Gas Business, Technosphere Safety, Rational Natural Resource Management: Modern Realities: Proceedings of the V All Russian scientific and practical conference dedicated to the 50th anniversary of DSTU.*** Makhachkala: DSTU; 2023: 173–176. (In Russian).
4. Smirnova EK, Zavarin DA, Lakhtionova AV, et al. Opornaya mezhevaya set' Vytegorskogo raiona Vologodskoi oblasti [The Reference Boendary Network of Vytegorsky Municipal District of the Vologda Region]. ***Moscow Economic Journal.*** 2022;7(1): 27–38. (In Russian). DOI:10.55186/2413046X_2022_7_1_22.
5. Tolstukhin AI, Yamshchikova KA. Analiz plotnosti geodezicheskikh setei Medvedevskogo raiona Respubliki Marii El [Analysis of Density of Geodetic Networks of the Medvedevsky District of the Republic of Mariy El]. ***Earth Sciences: From Theory to Practice (Archikov Lectures – 2020): Proceedings of the All Russian scientific and practical conference with international participation.*** Cheboksary: Sreda; 2020: 388–391. (In Russian).
6. Kuzovlev NA. Analiz sostoyaniya i tendentsii razvitiya geodezicheskikh setei v Rossii i za rubezhom [Analysis of the State and Development Trends of Geodetic Networks in Russia and Abroad]. ***Current Issues in Geodesy, Cartography, Geoinformatics, and Cadastre: Proceedings of the 9th All Russian scientific and practical conference.*** Ufa: UUST; 2025: 91–97. (In Russian).
7. Avrunev EI, Giniyatov AI. Nekotorye aspekty sozdaniya geodezicheskogo obespecheniya trekhmernogo kadastra nedvizhimosti [Some Aspects of Creating Geodetic Support for a Three-Dimensional Real Estate Cadastre]. ***Interexpo GEO Siberia. Proceedings of the XVI International Scientific Congress.*** In 8 vols. Vol. 3. Novosibirsk: SSUGT; 2020: 30–35. (In Russian). DOI:10.33764/2618-981X-2020-3-2-30-35.
8. Avrunev EI, Giniyatov AI. Tekhnologicheskaya skhema sozdaniya geodezicheskogo obespecheniya dlya tselei trekhmernogo kadastra nedvizhimosti [Technological Scheme for the Creation of Geodetic Support for Purposes of a Three-Dimensional Real Estate Cadastre]. ***Interexpo GEO Siberia. Proceedings of the XVIII International Scientific Congress.*** In 8 vols. Vol. 3. Novosibirsk: SSUGT; 2022: 49–55. (In Russian). DOI:10.33764/2618-981X-2022-3-49-55.
9. Avrunev EI, Khoroshilov VS, Meteleva MV. Issledovanie struktury geodezicheskogo obosnovaniya dlya obespecheniya kadastrovoi deyatel'nosti v territorial'nom obrazovanii [Study of the Structure of the Geodetic Basis for Supporting Cadastral Activity in a Territorial Entity]. ***Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying.*** 2015;S5: 82–86. (In Russian).

10. Avrunev EI, Meteleva MV. O sovershenstvovanii sistemy koordinatnogo obespecheniya gosudarstvennogo kadastra nedvizhimosti [Improvement of Coordinates Support of State Property Cadastre]. ***Vestnik SSUGT.*** 2014;25(1): 60–66. (In Russian).
11. Meteleva MV. ***Razrabotka i issledovanie metodiki koordinatnogo obespecheniya kadastrovoi deyatel'nosti v territorial'nykh obrazovaniyakh*** [Development and Study of a Methodology for Coordinate Support of Cadastral Activities in Territorial Entities] [dissertation]. Novosibirsk; 2015. 150 p. (In Russian).
12. Kostesha VA, Khromov AV. Primenenie setei differentsial'nykh geodezicheskikh stantsii dlya obespecheniya EGRN i GIS avtomobil'nykh dorog prostranstvennymi dannymi [Using Differential Geodetic Stations for Maintaining the Unified State Real Estate Register and Providing Roads' GIS with Spatial Data]. ***Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying.*** 2020;64(3): 277–288. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-3-277-288.
13. Tararin AM, Seitvelieva AS. Analiz luchshikh mirovykh praktik razvitiya 3D-kadastra s ispol'zovaniem tsifrovykh informatsionnykh modelei i ikh implementatsii v Rossii [Analysis of the World's Best Practices for Developing a 3D Cadastre Using BIM Models and Their Implementation in Russia]. ***Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying.*** 2025;69(2): 108–123. (In Russian) DOI:10.30533/GiA-2025-017.
14. Lemmen C, Oosterom P, Bennett R. The Land Administration Domain Model. ***Land Use Policy.*** 2015;49: 535–545. DOI:10.1016/j.landusepol.2015.01.014.
15. Valstad T. Developments of the 3D Cadastre in Norway. ***Shaping the Changes. XXIII FIG Congress 2006.*** Munich: FIG; 2006: 1–12.

author **Nikita A. Kuzovlev**
State University of Land Use Planning, Moscow, Russia
Department of Geodesy and Geoinformatics, Faculty of Geomatics and Spatial Development
0009-0009-3028-2583

Submitted: September 16, 2025. Accepted: June 23, 2026. Published: June 30, 2026.

УДК 528.4
DOI:10.30533/GiA-2026-030

CC BY

Классификация методов анализа пространственных данных

А.Ю. Горева[1]

[1] Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия
goreva_ay@mail.ru

цитирование Горева А.Ю. Классификация методов анализа пространственных данных // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 3. С. 117–129. DOI:10.30533/GiA-2026-030.

ключевые слова анализ пространственных данных, информационное обеспечение, кадастровая деятельность, землеустроительная деятельность, градостроительная деятельность

аннотация Статья посвящена разработке фасетной классификации методов анализа пространственных данных, пригодной для применения в кадастровой, землеустроительной и градостроительной деятельности и учитывающей специфику задач в каждой из перечисленных сфер. Выделены ключевые фасеты, позволяющие систематизировать методы по независимым признакам и характеризовать один метод одновременно с нескольких позиций («Применение», «Преобразование данных», «Технология» и «Методология»). Показаны принципы разработки классификации, рассматриваются ее преимущества по сравнению с традиционным иерархическим подходом, а также возможности учета современных технологий и существующих методов анализа. Формируемая система охватывает как универсальные, так и специализированные методы, включая методы, реализуемые с использованием геоинформационных систем, искусственного интеллекта, скриптовых и облачных технологий. В рамках исследования обоснованы критерии отнесения методов к специализированным на основе их связи с отраслевыми данными, информационными системами и нормативными документами. Приведены примеры распределения методов по различным фасетам. Предложенная классификация обеспечивает систематизацию и сопоставление методов анализа пространственных данных с учетом особенностей решаемых задач.

Рис. 1
Этапы методики исследования задач в области кадастровой, землеустроительной и градостроительной деятельности в разрезе анализа пространственных данных

Fig. 1
Stages of the methodology for investigating tasks in the fields of cadastral, land management, and urban planning through spatial data analysis

1 Введение

Анализ пространственных данных является ключевым компонентом цифровых преобразований, обеспечивая принятие обоснованных управленческих решений в кадастровой, землеустроительной и градостроительной деятельности. Это обусловлено тем, что на сегодняшний день технологии анализа данных, активно интегрируемые в отраслевые проекты, занимают центральное место среди технологических процессов в условиях цифровой трансформации государственного управления[1].

В статье [1] представлена методика исследования задач в области кадастровой, землеустроительной и градостроительной деятельности в разрезе анализа пространственных данных. Методика была апробирована на отдельных примерах из каждой отрасли: выявлении правообладателей ранее учтенных объектов недвижимости (кадастровая деятельность), инвентаризации сельскохозяйственных земель (землеустроительная деятельность) и предварительном согласовании схемы расположения земельного участка (градостроительная деятельность). На различных этапах решения рассматриваемых задач применяются методы, позволяющие интегрировать данные из различных источников, выполнять их преобразование и пространственный анализ с учетом особенностей соответствующей предметной области. На рис. 1 продемонстрированы этапы данной методики.

При применении методики к различным задачам кадастровой, землеустроительной и градостроительной деятельности выявляется множество методов анализа, различающихся по характеру работы с данными, применяемым технологиям, методологической основе и специфике решаемых задач. Целью данного исследования является разработка классификации методов анализа пространственных данных, обеспечивающей их систематизацию по независимым признакам с учетом специфики кадастровой, землеустроительной и градостроительной деятельности.

2 Материалы и методы

В качестве методологической основы классификации выбран фасетный подход, который предполагает выделение отдельных классификационных признаков (фасетов), характеризующих различные аспекты классифицируемых объектов [2]. В отличие от иерархических моделей, основанных на соподчинении классов и последовательном построении уровней классификации, фасетная классификация позволяет независимо комбинировать признаки, определяющие разные стороны объекта. Такая структура дает возможность расширять состав классифицируемых методов и учитывать появление новых аналитических задач без изменения общей логики классификации. Иерархические модели, напротив, ориентированы на упорядоченность и последовательность элементов, что находит применение, например, в классификации геосистем, разработанной А.К. Черкашиным [3].

Предлагаемая классификация включает четыре фасета: «Применение», «Преобразование данных», «Технология» и «Методология». Каждый из них характеризует метод анализа пространственных данных по самостоятельному классификационному признаку: области применения, типам входных и выходных данных, технологии реализации и научно-методологической основе

1 Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации государственного управления: распоряжение Правительства РФ от 16 марта 2024 г. № 637-р. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=603477098&backlink=1&nd=606589457&rdk= (дата обращения: 26.07.2025).

соответственно. Независимость фасетов позволяет одновременно характеризовать один метод по нескольким признакам.

При формировании структуры классификации учитывались также положения нормативных документов, устанавливающих требования к Национальной системе пространственных данных в части использования классификационных признаков и возможности применения различных систем классификации пространственных данных[2]. При этом положения стандарта задействованы применительно к общим принципам классификации пространственных данных и не определяют состав разработанных в настоящем исследовании фасетов классификации методов анализа.

В рамках настоящего исследования под методом анализа пространственных данных понимается повторно применимый способ обработки или анализа пространственных данных, характеризуемый назначением, требованиями к входным данным, принципом их преобразования и типом формируемого результата. Конкретное применение метода к определенному набору данных с заданными параметрами рассматривается как аналитическая операция в составе решаемой задачи.

Разработка структуры классификации базируется на следующих принципах.

1. **Атомарность.** Метод рассматривается как логически обособленная единица анализа, которая может применяться самостоятельно либо включаться в состав более сложной последовательности аналитических операций без потери своей смысловой завершенности.
2. **Многократное использование методов.** Метод рассматривается как повторно применимый способ обработки или анализа пространственных данных, который может использоваться при решении различных задач при изменении состава исходных данных и параметров выполнения.
3. **Определенность входных и выходных данных.** Для каждого метода должны быть определимы типы данных, используемых на входе и формируемых в результате его применения, что позволяет характеризовать выполняемое методом преобразование данных.
4. **Формализуемость классификационных признаков.** Отнесение метода к категориям классификации осуществляется на основании определенных признаков, характеризующих область его применения, типы входных и выходных данных, технологию реализации и научно-методологическую основу.
5. **Совместимость с отраслевыми стандартами и цифровыми платформами.** Классификация ориентирована на применение в кадастровой, землеустроительной и градостроительной деятельности и учитывает возможность использования методов при работе с отраслевыми информационными системами (Государственной информационной системой обеспечения градостроительной деятельности [ГИСОГД], Единым государственным реестром недвижимости [ЕГРН] и др.), а также требования к данным и документам, установленные для соответствующих отраслей.
6. **Методологическая обоснованность.** Классификация учитывает научно-методологическую основу методов и позволяет соотносить их с областями научного знания, в рамках которых сформировались соответствующие подходы к анализу пространственных данных.

Таким образом, предлагаемая классификация представляет собой открытую структуру, допускающую включение новых методов и уточнение состава категорий при сохранении установленных классификационных признаков и общей логики их применения.

---

2 ГОСТ Р 70846.4-2023. Национальная система пространственных данных. Система классификации и кодирования. Разработка и применение систем классификации и кодирования пространственных данных. Общие требования. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 23 с.

2.1 Фасет 1 «Применение»

Классификационным основанием данного фасета выступает направленность методов пространственного анализа на решение прикладных задач. Методы группируются в зависимости от широты их применения — универсального или отраслевого характера. Это позволяет разграничивать методы общего применения и методы, использование которых обусловлено спецификой соответствующей отрасли.

Фасет включает две категории методов:

- универсальные — применимы в различных отраслях и не привязаны к конкретной нормативной или информационной инфраструктуре;
- специализированные — применяются в рамках кадастровой, землеустроительной и градостроительной деятельности и предполагают выполнение аналитических операций в отношении специфичных для отрасли данных, информационных систем или документов, формируемых по отраслевым стандартам и регламентам.

Универсальные методы могут применяться при решении различных задач пространственного анализа независимо от конкретной отраслевой информационной или нормативной инфраструктуры.

Примеры универсальных методов:

- геокодирование;
- построение буферных зон;
- сетевой анализ;
- регрессионный анализ;
- оверлейные операции;
- пространственная интерполяция;
- пространственная кластеризация объектов (например, методами *k*-средних и DBSCAN).

Специализированные методы характеризуются применением в отношении отраслевых данных, информационных систем и документов, структура, содержание или порядок формирования которых определяются спецификой соответствующей области деятельности. При этом сам факт использования метода при решении кадастровой, землеустроительной или градостроительной задачи не является достаточным основанием для его отнесения к специализированным.

Для включения методов пространственного анализа в категорию специализированных используется ряд классификационных критериев, отражающих контекст прикладного применения. Такими критериями являются действия в отношении:

1) данных, специфичных для отрасли;
2) отраслевой информационной системы;
3) документа, формируемого по стандарту, специфичному для отрасли.

Соответствие метода хотя бы одному из указанных критериев служит достаточным основанием для отнесения к специализированной группе. Это позволяет четко разграничивать универсальные и специализированные методы пространственного анализа. Примеры специализированных методов с указанием их соответствия данным критериям представлены в табл. 1.

Следует отметить, что наличие отраслевого контекста применения само по себе не является достаточным основанием для отнесения метода к специализированным. Универсальные методы пространственного анализа могут применяться при решении кадастровых, землеустроительных и градостроительных задач без изменения их классификационной принадлежности. Например, построение буферных зон, оверлейный анализ или пространственная кластеризация сохраняют универсальный характер, если их применение не обусловлено специфической структурой отраслевых данных, взаимодействием с отраслевой информационной системой либо требованиями к регламентированному документу. Специализированный метод анализа пространственных данных — метод, реализующий обработку или анализ пространственных данных по правилам, обусловленным спецификой отраслевых данных, информационных систем или документов.

Метод	Данные, специфичные для отрасли	Отраслевая информационная система	Документ, формируемый по стандарту, специфичному для отрасли
Кадастровая деятельность			
Извлечение и структурирование сведений об объектах недвижимости из документов ЕГРН	Выписка из ЕГРН, кадастровый план территории	—	—
Проверка пространственно-семантического соответствия сведений об объектах недвижимости	Пространственные и семантические сведения ЕГРН об объектах недвижимости	—	—
Землеустроительная деятельность			
Определение пространственных характеристик объекта землеустройства	Сведения о местоположении, размерах и границах объекта землеустройства	—	Карта (план) объекта землеустройства
Проверка пространственного соответствия границ объекта землеустройства	Координатное описание границ объекта землеустройства	—	Карта (план) объекта землеустройства
Градостроительная деятельность			
Определение территориальной зоны по местоположению земельного участка	Границы земельного участка и территориальных зон	ГИСОГД	Правила землепользования и застройки
Извлечение параметров градостроительного регламента по территориальной принадлежности объекта	Сведения о земельном участке и территориальной зоне	ГИСОГД	Градостроительный регламент

Таблица 1
Примеры специализированных методов анализа пространственных данных и их соответствие классификационным критериям

Table 1
Examples of specialized spatial data analysis methods and their compliance with classification criteria

2.2 Фасет 2 «Преобразование данных»

Основой предлагаемого фасета является характеристика методов анализа по типам данных на входе и выходе. Методы классифицируются в зависимости от того, какие данные используются при выполнении метода, а какие формируются в результате его применения. Это позволяет описать характер преобразования информации в процессе пространственного анализа.

Фасет представлен в виде матрицы соответствия типов входных и выходных данных. Для каждого метода определяются типы данных, поступающих на вход и формируемых на выходе.

Входные и выходные данные представлены такими категориями, как:
- метрика (числовые и геометрические характеристики);
- семантика (содержательные и атрибутивные характеристики);
- метаданные (сведения о структуре, составе и характеристиках данных);
- внешние данные (данные, получаемые из внешних источников или передаваемые во внешние системы).

Комбинация типов входных и выходных данных характеризует преобразование, выполняемое методом. Например, результатом обработки метрических данных могут быть новые метрические характеристики или семантическая информация, тогда как обработка семантических данных может приводить к формированию новых атрибутивных или метрических характеристик. Если метод использует или формирует несколько типов данных, для него указывается соответствующая комбинация входных и (или) выходных типов.

Типовые примеры таких преобразований, сгруппированные по комбинациям входных и выходных данных, представлены в табл. 2.

Обрабатываемые данные	Получаемые данные	Описание преобразования	Примеры методов и операций
Метрика	Метрика	Геометрические преобразования	Буферизация, проекционные трансформации
Метрика	Семантика	Генерация содержательной информации	Определение пространственной принадлежности
Метрика	Метаданные	Формирование описания пространственных данных	Формирование метаданных о пространственных характеристиках
Семантика	Семантика	Модификация / обогащение атрибутивной информации	Переклассификация, обновление атрибутов
Семантика	Метрика	Генерация числовых характеристик	Расчет количественных характеристик
Семантика	Метаданные	Генерация описаний	Формирование метаданных на основе атрибутивной информации
Метаданные	Метаданные	Стандартизация, конвертация	Унификация структуры, преобразование метаданных
Метаданные	Метрика	Формирование количественных характеристик качества данных	Расчет показателей полноты и соответствия метаданных
Метаданные	Семантика	Генерация содержательной информации	Подбор ключевых слов на основе метаданных
Внешние данные	—	Импорт данных	Получение данных посредством WFS, импорт данных в форматах GeoJSON, CSV
—	Внешние данные	Экспорт данных	Экспорт в XML, SHP, GPKG

Таблица 2
Примеры комбинаций обрабатываемых и получаемых данных

Table 2
Examples of combinations of input and output data

2.3 Фасет 3 «Технология»

Рассматриваемый фасет классифицирует методы анализа пространственных данных в зависимости от технологической среды их реализации. Он позволяет характеризовать методы с учетом используемых программных и вычислительных технологий.

Фасет включает следующие категории, определяемые доминирующей технологией реализации метода:

1) геоинформационные технологии (ГИС), обеспечивающие сбор, хранение, обработку и анализ пространственных данных и применяемые для решения широкого круга отраслевых задач [4];
2) технологии искусственного интеллекта, применяемые для классификации, кластеризации, выявления пространственных закономерностей, моделирования и прогнозирования на основе пространственных данных (к данной категории относятся, в частности, методы машинного обучения [5]);
3) облачные технологии и веб-сервисы, обеспечивающие хранение, обработку, анализ и предоставление пространственных данных и результатов их обработки через веб-среду [6];
4) технологии программной обработки и автоматизации, предусматривающие формирование и выполнение последовательностей операций обработки и анализа пространственных данных в виде геоаналитических рабочих процессов [7];
5) технологии пространственного моделирования, обеспечивающие представление и анализ пространственных объектов, их взаимного расположения и топологических отношений [8].

Примеры методов и инструментов фасета «Технология» представлены в табл. 3.

Отнесение метода к определенной категории данного фасета осуществляется по доминирующей технологии его реализации. Категории фасета характеризуют преимущественно технологическую основу реализации метода и не исключают совместного использования нескольких технологий при выполнении конкретной аналитической операции; при этом один и тот же метод может иметь различные программные реализации.

Категория	Методы	Инструменты
ГИС	– буферизация объектов; – картометрические измерения; – оверлейные операции	ArcGIS, QGIS, AutoCAD Map 3D
Технологии искусственного интеллекта	– классификация спутниковых снимков; – прогнозирование изменений застройки; – кластеризация объектов	TensorFlow, PyTorch, scikit-learn
Облачные технологии и веб-сервисы	– обработка пространственных данных в облачной среде; – веб-картографическая визуализация; – публикация и использование пространственных веб-сервисов	Google Earth Engine, Mapbox, ArcGIS Online
Технологии программной обработки и автоматизации	– пространственные запросы; – пакетная обработка и преобразование данных; – автоматизация последовательностей аналитических операций	Python (GeoPandas), PostGIS, FME
Технологии пространственного моделирования	– моделирование пространственных отношений – анализ топологических отношений; – проверка геометрической и топологической согласованности пространственных моделей	Oracle Spatial

Таблица 3
Категории фасета «Технология» с примерами методов и инструментов

Table 3
Categories of the “Technology” facet with examples of methods and tools

2.4 Фасет 4 «Методология»

Предлагаемый фасет характеризует научно-методологическую принадлежность методов анализа пространственных данных посредством их соотнесения с областями научного знания, в рамках которых сформировались и получили развитие соответствующие подходы к пространственному анализу.

Для систематизации наименований научных направлений использована номенклатура научных специальностей, утвержденная Министерством науки и высшего образования Российской Федерации[3].

Фасет включает следующие основные научные направления, в которых используются пространственные методы анализа:

1) «Компьютерные науки и информатика»;
2) «Информационные технологии и телекоммуникации»;
3) «Науки о Земле и окружающей среде»;
4) «Агрономия, лесное и водное хозяйство»;
5) «Недропользование и горные науки»;
6) «Экономика»;
7) «Строительство и архитектура».

Примеры методов и областей их применения в рамках фасета «Методология» представлены в табл. 4.

Таблица 4
Категории фасета «Методология» с примерами методов и областей их применения

Table 4
Categories of the “Methodology” facet with examples of methods and application areas

Научное направление	Методы	Область применения
Компьютерные науки и информатика	– метод случайного леса; – метод опорных векторов; – нейросетевая классификация и сегментация изображений	Автоматизация анализа данных дистанционного зондирования Земли, интеллектуальная обработка изображений, мониторинг изменений
Информационные технологии и телекоммуникации	– методы потоковой обработки пространственных данных; – методы интеграции распределенных пространственных данных; – методы обработки пространственных данных в распределенных информационных системах	Веб-ГИС, облачные платформы, распределенная обработка данных

3 Об утверждении номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, и внесении изменения в Положение о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утвержденное приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 10 ноября 2017 г. № 1093: приказ Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. № 118 (ред. от 24 июля 2023 г.). [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=602140953 (дата обращения: 10.08.2025).

Научное направление	Методы	Область применения
Науки о Земле и окружающей среде	– геостатистика (вариограммный анализ); – пространственная интерполяция (кригинг, метод обратных взвешенных расстояний); – анализ плотности (ядерная оценка плотности)	Оценка пространственной неоднородности, моделирование распределений, экологический мониторинг
Агрономия, лесное и водное хозяйство	– расчет и анализ вегетационных индексов; – пространственный анализ состояния земель; – моделирование водосборов	Оценка состояния земель, планирование агротехнических мероприятий, управление водными ресурсами
Недропользование и горные науки	– пространственное моделирование месторождений; – анализ пространственной структуры геологических объектов; – трехмерное геологическое моделирование	Геологоразведка, планирование добычи, анализ минеральных ресурсов
Экономика	– пространственная оптимизация размещения объектов; – моделирование зон притяжения (гравитационная модель); – оценка доступности услуг	Логистика, бизнес-планирование, оценка рыночного потенциала
Строительство и архитектура	– моделирование развития территорий; – расчет показателей плотности застройки; – сетевой анализ транспортной доступности	Градостроительное планирование, проектирование инфраструктуры, прогнозирование сценариев освоения территорий

Таблица 4
Окончание
Table 4
End

3 Результаты и обсуждение

Актуальность систематизации методов пространственного анализа связана в том числе с развитием цифрового информационного обеспечения градостроительной деятельности и внедрением государственных информационных систем обеспечения градостроительной деятельности [9]. В качестве примера применения разработанной классификации рассмотрена задача выявления правообладателей ранее учтенных объектов недвижимости, представляющая собой одно из направлений работ по наполнению ЕГРН сведениями о правообладателях таких объектов [10]. Была проанализирована последовательность выполнения данной задачи. На основе описания бизнес-процесса были выделены аналитические операции и применяемые при их выполнении методы обработки и анализа пространственных данных (табл. 5).

На основе представленных в табл. 5 этапов бизнес-процесса и выявленных методов выполнено их распределение по четырем фасетам разработанной классификации: «Применение», «Преобразование данных», «Технология» и «Методология». Результаты классификации представлены в табл. 6.

Полученные результаты развивают применение фасетного подхода к систематизации методов анализа пространственных данных. В отличие от иерархической классификации, при которой объект соотносится с определенным положением в структуре классов, фасетный подход позволяет характеризовать его одновременно по нескольким независимым признакам [2]. Рассмотренный пример показал, что такой принцип применим к методам анализа пространственных данных: один и тот же метод может быть охарактеризован по области применения, характеру преобразования данных, технологии реализации и научно-методологической основе.

Результаты исследования соотносятся с современными направлениями развития геопространственной деятельности, связанными с расширением состава пространственных данных, технологий их обработки и аналитических инструментов [11]. Существенной особенностью пространственного анализа является зависимость применяемых методов и получаемых результатов от характеристик исследуемых пространственных данных и процессов, в том числе от пространственного масштаба исследования [12]. Развитие методов пространственного анализа происходит одновременно по нескольким направлениям и включает применение методов пространственного машинного обучения [5], развитие методов анализа геопространственных данных в задачах исследования городской среды [13], а также автоматизацию отдельных этапов аналитической обработки и поддержки принятия пространственных решений [14].

Таблица 5

Методы обработки и анализа пространственных данных, выявленные при исследовании задачи по выявлению правообладателей ранее учтенных объектов недвижимости

Table 5

Methods for spatial data processing and analysis identified in the study of the cadastral task of identifying right holders of previously registered real estate objects

Этап бизнес-процесса	Аналитические операции	Выявленные методы
Сбор данных	**Планирование, сбор и интеграция данных, составление онтологии, выбор данных**	
	Запрос и получение данных о ранее учтенных объектах недвижимости из Росреестра, Федеральной налоговой службы, бюро технической инвентаризации, ЗАГС, Министерства внутренних дел, Фонда пенсионного и социального страхования Российской Федерации (Социального фонда России), Федеральной нотариальной палаты	Интеграция сведений из внешних информационных источников
Предварительная обработка	**Чистка, фильтрация, работа с отсутствующими переменными, коррекция, стандартизация**	
	Объединение наборов данных из разных источников по кадастровому номеру, конвертация данных различных форматов и их объединение в единой базе данных	Структурирование и стандартизация разнородных данных
Анализ данных	**Построение модели анализа — описание алгоритма аналитической операции**	
	Выявление противоречий в данных, полученных из различных источников, установление связи земельного участка с объектом капитального строительства	Объединение пространственных и семантических данных; атрибутивное соединение данных по кадастровому номеру; анализ согласованности данных; анализ пространственных связей земельных участков и объектов капитального строительства
Постобработка	**Интерпретация результатов, принятие решений, документация, оценка**	
	Принятие решения о выявлении правообладателя ранее учтенных объектов недвижимости, подача заявления, контроль внесения данных в ЕГРН	—

Таблица 6

Распределение выявленных методов анализа пространственных данных по фасетам классификации

Table 6

Distribution of the identified spatial data analysis methods across classification facets

Метод анализа	Фасет 1 «Применение»	Фасет 2 «Преобразование данных»	Фасет 3 «Технология»	Фасет 4 «Методология»
Интеграция сведений из внешних информационных источников	Универсальный	Исходные данные: внешние данные; результат: семантика	Технологии программной обработки и автоматизации	Информационные технологии и телекоммуникации
Структурирование и стандартизация разнородных данных	Универсальный	Исходные данные: метрика / семантика; результат: метрика /семантика	Технологии программной обработки и автоматизации	Компьютерные науки и информатика
Объединение пространственных и семантических данных	Универсальный	Исходные данные: метрика + семантика; результат: метрика + семантика	Технологии программной обработки и автоматизации	Компьютерные науки и информатика
Атрибутивное соединение данных по кадастровому номеру	Специализированный (кадастровая деятельность)	Исходные данные: семантика; результат: семантика	Технологии программной обработки и автоматизации	Компьютерные науки и информатика
Анализ согласованности данных	Универсальный	Исходные данные: семантика; результат: семантика	Технологии программной обработки и автоматизации	Компьютерные науки и информатика
Анализ пространственных связей земельных участков и объектов капитального строительства	Специализированный (кадастровая деятельность)	Исходные данные: метрика + семантика; результат: семантика	Геоинформационные технологии (ГИС)	Науки о Земле и окружающей среде

При этом развитие аналитических методов сопровождается повышением требований к исходным пространственным данным и учету их особенностей. Существенное значение имеют метаданные, позволяющие характеризовать наборы пространственных данных и оценивать их пригодность для решения конкретных задач [15]. При использовании методов геопространственного моделирования необходимо также учитывать особенности распределения исходных данных, пространственную автокорреляцию, неопределенность и обобщающую способность моделей [16].

Таким образом, существующие направления развития пространственного анализа характеризуют методы с различных сторон: по области применения, характеру преобразования данных, технологии реализации и научно-методологической основе. Это соответствует заложенному в разработанную классификацию принципу независимого описания методов по нескольким фасетам. Результаты рассмотренного примера показывают возможность применения предложенной классификации для систематизации методов анализа пространственных данных при решении отраслевых задач.

4 Выводы

В результате исследования разработана фасетная классификация методов анализа пространственных данных, включающая четыре независимых фасета: «Применение», «Преобразование данных», «Технология» и «Методология». Предложенная структура позволяет характеризовать методы с учетом области их применения, типов входных и выходных данных, технологии реализации и научно-методологической основы. Применение классификации на примере задачи выявления правообладателей ранее учтенных объектов недвижимости показало возможность систематизации используемых методов и разграничения универсальных и специализированных методов. Фасетный принцип обеспечивает независимое описание различных характеристик одного метода и возможность их совместного учета при решении конкретной задачи. Разработанная классификация может использоваться для систематизации и сопоставления методов анализа пространственных данных в кадастровой, землеустроительной и градостроительной деятельности и служить основой для дальнейшей формализации методов, а также построения последовательностей их применения при решении отраслевых задач.

библиография

1. Атаманов С.А., Горева А.Ю. Анализ пространственных данных в кадастровой, землеустроительной и градостроительной деятельности // Вестник МИИГАиК: сборник научных статей 79-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в рамках Международной студенческой недели науки СНН-2024. М.: МИИГАиК, 2024. С. 34–46.
2. Broughton V. Facet Analysis: The Evolution of an Idea // Cataloging & Classification Quarterly. 2023. Vol. 61. Iss. 5-6. P. 411–438. DOI:10.1080/01639374.2023.2196291.
3. Черкашин А.К. Иерархическая классификация географических систем // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2021. Т. 35. С. 125–153. DOI:10.26516/2073-3402.2021.35.125.
4. Атаманов С.А., Григорьев С.А., Илюшина Т.В. и др. Новые тренды и технологии в научной специальности 1.6.15. Землеустройство, кадастр и мониторинг земель // Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 6. С. 106–119. DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-6-106-119.
5. Kopczewska K. Spatial Machine Learning: New Opportunities for Regional Science // The Annals of Regional Science. 2022. Vol. 68. P. 713–755. DOI:10.1007/s00168-021-01101-x.
6. Mete M.O., Yomralioglu T. Implementation of Serverless Cloud GIS Platform for Land Valuation // International Journal of Digital Earth. 2021. Vol. 14. Iss. 7. P. 836–850. DOI:10.1080/17538947.2021.1889056.

7. Kruiger J.F., Kasalica V., Meerlo R., et al. Loose Programming of GIS Workflows with Geo-Analytical Concepts // Transactions in GIS. 2021. Vol. 25. Iss. 1. P. 424–449. DOI:10.1111/tgis.12692.
8. Fu L., Yin P., Li G., et al. Characteristics and Classification of Topological Spatial Relations in 3-D Cadasters // Information. 2018. Vol. 9. Iss. 4. P. 71. DOI:10.3390/info9040071.
9. Скачкова М.Е., Гурьева О.С. Информационное обеспечение градостроительной деятельности в России // Геодезия и картография. 2022. Т. 83, № 8. С. 45–55. DOI:10.22389/0016-7126-2022-986-8-45-55.
10. Батуева Э.Ц. Выявление правообладателей ранее учтенных объектов недвижимости как новое направление по наполнению Единого государственного реестра недвижимости // Правовая мысль. 2021. № 1 (2). С. 55–58. DOI:10.55000/MCU.LegTh.2021.2.1.010.
11. Карпик А.П., Лисицкий Д.В., Мусихин И.А. Развитие геопространственной деятельности в России: стратегические направления и первоочередные задачи // Геодезия и картография. 2023. № 12. С. 49–58. DOI:10.22389/0016-7126-2023-1002-12-49-58.
12. Oshan T.M., Wolf L.J., Sachdeva M., et al. A Scoping Review on the Multiplicity of Scale in Spatial Analysis // Journal of Geographical Systems. 2022. Vol. 24. P. 293–324. DOI:10.1007/s10109-022-00384-8.
13. Casali Y., Aydin N.Y., Comes T. Machine Learning for Spatial Analyses in Urban Areas: A Scoping Review // Sustainable Cities and Society. 2022. Vol. 85. P. 104050. DOI:10.1016/j.scs.2022.104050.
14. Wen R., Li S. Spatial Decision Support Systems with Automated Machine Learning: A Review // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2023. Vol. 12. Iss. 1. P. 12. DOI:10.3390/ijgi12010012.
15. Ziaimatin H., Nili A., Barros A. Reducing Consumer Uncertainty: Towards an Ontology for Geospatial User-Centric Metadata // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2020. Vol. 9. Iss. 8. P. 488. DOI:10.3390/ijgi9080488.
16. Koldasbayeva D., Tregubova P., Gasanov M., et al. Challenges in Data-Driven Geospatial Modeling for Environmental Research and Practice // Nature Communications. 2024. Vol. 15. P. 10700. DOI:10.1038/s41467-024-55240-8.

автор **Горева Анастасия Юрьевна**
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра землеустройства и кадастров, факультет управления территориями
0009-0007-2388-4960

Поступила 15.08.2025. Принята к публикации 23.06.2026. Опубликована 30.06.2026.

UDC 528.4
DOI:10.30533/GiA-2026-030

CC BY

Classification of Spatial Data Analysis Methods

Anastasia Yu. Goreva[1]

[1] Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
goreva_ay@mail.ru

citation Goreva AYu. Classification of Spatial Data Analysis Methods. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying.* 2026;70(3): 117–129. DOI:10.30533/GiA-2026-030.

keywords spatial data analysis, information support, cadastral activities, land management activities, urban planning activities

abstract The article is devoted to the development of a facet classification of spatial data analysis methods intended for use in cadastral, land management, and urban planning activities. The study aims to develop a structured system for classifying methods that takes into account the specific features of tasks in each of these fields. Key facets are identified that make it possible to systematize methods according to independent criteria and to characterize the same method simultaneously from several perspectives. The principles underlying the development of the classification, its advantages over the traditional hierarchical approach, and the possibilities for incorporating modern technologies and existing analysis methods are presented. The proposed system covers both universal and specialized methods, including methods implemented using geographic information systems, artificial intelligence, scripting, and cloud technologies. The article substantiates the criteria for classifying methods as specialized based on their relationship with domain-specific data, information systems, and regulatory documents. Examples of methods distributed across different facets are provided. The proposed classification enables the systematization and comparison of spatial data analysis methods while taking into account the specific features of the tasks being addressed.

references

1. Atamanov SA, Goreva AYu. Analiz prostranstvennykh dannykh v kadastrovoi, zemleustroitel'noi i gradostroitel'noi deyatel'nosti [Spatial Data Analysis in Cadastral, Land Management and Urban Planning Activities]. *Bulletin of 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.* Moscow: MIIGAiK; 2024: 34–46. (In Russian).
2. Broughton V. Facet Analysis: The Evolution of an Idea. *Cataloging & Classification Quarterly.* 2023;61(5-6): 411–438. DOI:10.1080/01639374.2023.2196291.

3. Cherkashin AK. Ierarkhicheskaya klassifikatsiya geograficheskikh sistem [Hierarchical Classification of Geographical Systems]. ***The Bulletin of Irkutsk State University. Series: Earth Sciences.*** 2021;35: 125–153. (In Russian). DOI:10.26516/2073-3402.2021.35.125.
4. Atamanov SA, Grigoriev SA, Ilyushina TV, et al. Novye trendy i tekhnologii v nauchnoi spetsial'nosti 1.6.15. Zemleustroistvo, kadastr i monitoring zemel' [New Trends and Technologies in Scientific Specialty 1.6.15. Land Management, Cadastre and Land Monitoring]. ***Vestnik SSUGT.*** 2024;29(6): 106–119. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-6-106-119.
5. Kopczewska K. Spatial Machine Learning: New Opportunities for Regional Science. ***The Annals of Regional Science.*** 2022;68: 713–755. DOI:10.1007/s00168-021-01101-x.
6. Mete MO, Yomralioglu T. Implementation of Serverless Cloud GIS Platform for Land Valuation. ***International Journal of Digital Earth.*** 2021;14(7): 836–850. DOI:10.1080/17538947.2021.1889056.
7. Kruiger JF, Kasalica V, Meerlo R, et al. Loose Programming of GIS Workflows with GeoAnalytical Concepts. ***Transactions in GIS.*** 2021;25(1): 424–449. DOI:10.1111/tgis.12692.
8. Fu L, Yin P, Li G, et al. Characteristics and Classification of Topological Spatial Relations in 3-D Cadasters. ***Information.*** 2018;9(4): 71. DOI:10.3390/info9040071.
9. Skachkova ME, Guryeva OS. Informatsionnoe obespechenie gradostroitel'noi deyatel'nosti v Rossii [Information Support for Urban Planning Activities in Russia]. ***Geodesy and Cartography.*** 2022;83(8): 45–55. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2022-986-8-45-55.
10. Batueva ETs. Vyyavlenie pravoobladatelei ranee uchtennykh ob"ektov nedvizhimosti kak novoe napravlenie po napolneniyu Edinogo gosudarstvennogo reestra nedvizhimosti [Identification of Title Holders of Previously Recorded Real Estate Objects as a New Direction for Filling the Unified State Real Estate Register]. ***Legal Thought.*** 2021;1(2): 55–58. (In Russian). DOI:10.55000/MCU.LegTh.2021.2.1.010.
11. Karpik AP, Lisitsky DV, Musikhin IA. Razvitie geoprostranstvennoi deyatel'nosti v Rossii: strategicheskie napravleniya i pervoocherednye zadachi [Development of Geospatial Activities in Russia: Strategic Directions and Priorities]. ***Geodesy and Cartography.*** 2023;12: 49–58. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2023-1002-12-49-58.
12. Oshan TM, Wolf LJ, Sachdeva M, et al. A Scoping Review on the Multiplicity of Scale in Spatial Analysis. ***Journal of Geographical Systems.*** 2022;24: 293–324. DOI:10.1007/s10109-022-00384-8.
13. Casali Y, Aydin NY, Comes T. Machine Learning for Spatial Analyses in Urban Areas: A Scoping Review. ***Sustainable Cities and Society.*** 2022;85: 104050. DOI:10.1016/j.scs.2022.104050.
14. Wen R, Li S. Spatial Decision Support Systems with Automated Machine Learning: A Review. ***ISPRS International Journal of Geo-Information.*** 2023;12(1): 12. DOI:10.3390/ijgi12010012.
15. Ziaimatin H, Nili A, Barros A. Reducing Consumer Uncertainty: Towards an Ontology for Geospatial User-Centric Metadata. ***ISPRS International Journal of Geo-Information.*** 2020;9(8): 488. DOI:10.3390/ijgi9080488.
16. Koldasbayeva D, Tregubova P, Gasanov M, et al. Challenges in Data-Driven Geospatial Modeling for Environmental Research and Practice. ***Nature Communications.*** 2024;15: 10700. DOI:10.1038/s41467-024-55240-8.

author **Anastasia Yu. Goreva**
Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Land Management and Cadastre, Faculty of Territory Management
0009-0007-2388-4960

Submitted: August 15, 2025. Accepted: June 23, 2026. Published: June 30, 2026.

УДК 535.317.2+535.318+681.7
DOI:10.30533/GiA-2026-031

CC BY

Проектирование трехосевой сканирующей лазерной системы для установок селективного лазерного плавления: от конструкции зеркал до расчета динамической фокусировки

И.С. Шарапов[1] ✉, **Г.Е. Верба**[1]

[1] АО «НИИ НПО „ЛУЧ“», Подольск, Россия
✉ fds171@mail.ru

цитирование Шарапов И.С., Верба Г.Е. Проектирование трехосевой сканирующей лазерной системы для установок селективного лазерного плавления: от конструкции зеркал до расчета динамической фокусировки // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 3. С. 130–150. DOI:10.30533/GiA-2026-031.

ключевые слова сканирующее зеркало, сканирующая лазерная система, система динамической фокусировки, прочность зеркал, селективное лазерное плавление, конструкция зеркал

аннотация В данной статье рассмотрен метод проектирования трехосевых лазерных сканирующих систем, отвечающих современным тенденциям при размещении в установках селективного лазерного плавления. На основе анализа характеристик современных приборов сформулированы главные требования к сканирующим системам, включая определение наилучшей конфигурации системы установок с большим количеством лазерных источников. Определены аналитические зависимости, обеспечивающие минимальные размеры отражающей поверхности сканирующих зеркал в трехосевой сканирующей системе с учетом особенностей их размещения и толщины. Приведены способы оптимизации конструкции зеркал, а также сравнительный анализ прочности и динамических характеристик зеркал различной конфигурации, на основе которого сформулированы принципы выбора конкретной формы и материала сканирующих зеркал, основанные на компромиссе между массогабаритными и прочностными характеристиками. Представлена математическая модель сканирующей лазерной системы, обеспечивающая возможность автоматической фокусировки в зависимости от углов поворота зеркал. Данная модель включает аналитические выражения, которые описывают длину пути осевого пучка в двухзеркальной сканирующей системе, взаимосвязь заднего фокального отрезка с положением подвижного компонента, а также алгоритм расчета положения линзы в реальном исполнении динамического узла на основе гальвомотора. Приведены результаты исследования некоторых характеристик изготовленной в соответствии с изложенными в данной статье методами проектирования сканирующей системы.

1 Введение

Тенденция к постоянному развитию техники и технологий приводит к изменению организации производства. Неотъемлемой частью новой промышленной революции является внедрение аддитивного производства, суть которого состоит в получении изделий по электронной трехмерной (3D) модели путем послойного добавления материала [1–3]. В связи с необходимостью соответствия передовому научному прогрессу и достижения технологического лидерства Правительство Российской Федерации 14 июля 2021 года выпустило распоряжение № 1913-р «Об утверждении Стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года»[1], которое определяет основные направления государственной политики в сфере развития отечественной отрасли аддитивных технологий, включая создание отечественной отрасли аддитивного производства и освоение приоритетных промышленных технологий.

Одной из ведущих и распространенных на данный момент технологий аддитивного производства конструктивных изделий из металлов является селективное лазерное плавление (*англ.* Selective Laser Melting, SLM), которое представляет собой процесс плавления слоя порошкового материала, где в качестве источника энергии используется лазерное излучение с высокой плотностью мощности. Более подробно процесс SLM рассматривается в работах [4, 5].

Между тем реализация стратегии тормозится критическим отсутствием отечественных комплектующих для аддитивного оборудования. Основным узлом SLM-установки является сканирующая лазерная система, главная задача которой — передача энергии лазерного излучения в конкретную точку рабочего поля. Однако в настоящее время отечественные изделия серийно не производятся, что вынуждает производителей аддитивного оборудования использовать импортные комплектующие, которые поставляются в виде закрытых модулей без технической поддержки. Все это не позволяет полноценно настраивать сканирующие системы под отдельные требования отечественных разработчиков.

Таким образом, разработка сканирующих лазерных систем представляет собой актуальную научно-техническую задачу, играющую ключевую роль в обеспечении технологического суверенитета отечественного машиностроения и формировании научно-технической базы для развития нового поколения SLM-установок.

Проектирование сканирующей системы, входящей в состав аддитивной установки, является нетривиальной задачей, требующей комплексного подхода. При разработке таких систем необходимо учитывать множество факторов, оказывающих влияние друг на друга. Несмотря на это, первоначальным этапом проектирования является формулировка требований к параметрам сканирующей системы, которые являются основополагающими для технологического процесса селективного лазерного плавления [6]. Сканирующая система прибора представляет собой важнейшую часть аппаратуры, т. к. определяет множество характеристик. Наиболее часто в таких системах применяется система качающихся зеркал, форма и материал которых влияют на динамические характеристики. Еще одной важной особенностью является система управления переменной фокусировки (третьей оси), т. к. в открытых источниках нет общей математической модели, способной полностью описать алгоритм работы этого модуля.

В данной статье предложен новый метод проектирования сканирующих лазерных систем для SLM с учетом технологических возможностей промышленности, который включает в себя:

1 Об утверждении Стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 14 июля 2021 г. № 1913-р. [Электронный ресурс]. Режим доступа: pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=606500763&backlink=1&nd=602338866&rdk= (дата обращения: 02.05.2026).

- определение требований к характеристикам системы и рациональной конфигурации прибора в целом;
- установление новых аналитических зависимостей, которые обеспечивают оптимальные массогабаритные и динамические параметры сканирующих зеркал за счет минимизации отражающей поверхности, определения формы и материала сканирующих зеркал;
- создание новой аналитической модели схемы сканирующей системы, содержащей коллиматор с динамической линзой и объектив, позволяющей фокусировать лазерное излучение за счет непрерывного изменения его расходимости;
- разработку математической модели, которая описывает зависимость длины пути лазерного пучка от углов поворота сканирующих зеркал, что обеспечивает общий принцип управления модулем переменной фокусировки.

2 Материалы и методы

На первом этапе исследования на основе анализа и сравнения сформирован метод, позволяющий комплексно и системно подходить к процессу проектирования сканирующей системы. Определены и сформулированы основные требования, предъявляемые к сканирующим системам, которые соответствуют современному уровню техники.

На втором этапе были описаны аналитические выражения, определяющие габаритные размеры зеркальной сканирующей системы, проведены анализ и оценка результатов моделирования деформации формы зеркал конечных размеров. Моделирование осуществлялось в среде системы автоматизированного проектирования SOLIDWORKS Simulation для зеркал различной степени оптимизации формы. В первую очередь оценка проводилась по таким параметрам, как масса, момент инерции и максимальное значение деформации отражающей поверхности.

На третьем этапе на основе аналитического подхода сформированы выражения, описывающие геометрию хода луча в зеркальной сканирующей системе и зависимость заднего фокального отрезка от положения подвижного фокусирующего компонента.

На заключительном этапе (при апробации) были использованы средства измерения для контроля размера фокального пятна и определения мощности лазерного излучения.

2.1 Метод проектирования сканирующей системы

С целью разработки сканирующей лазерной системы для SLM в статье предлагается метод проектирования, который включает в себя последовательность таких операций, как:

- анализ технических требований;
- расчет необходимых углов сканирования для требуемых габаритов рабочего поля;
- расчет системы сканирующих зеркал;
- расчет оптической системы;
- проектирование конструктивных элементов сканирующих систем;
- расчеты системы фокусировки;
- расчет тепловых нагрузок сканирующей системой под воздействием рабочего лазерного излучения.

Перечисленные операции связаны между собой. В целом предполагается итерационный процесс, когда операции повторяются при изменении других элементов. Взаимосвязь элементов предлагаемого метода представлена в виде схемы на рис. 1.

Рис. 1
Схема метода проектирования сканирующих систем

Fig. 1
Scheme of the scanning system design method

Далее в статье опущены некоторые операции, которые основываются на общеизвестных понятиях, и приведены пункты, обладающие новизной и уточняющие некоторые известные зависимости.

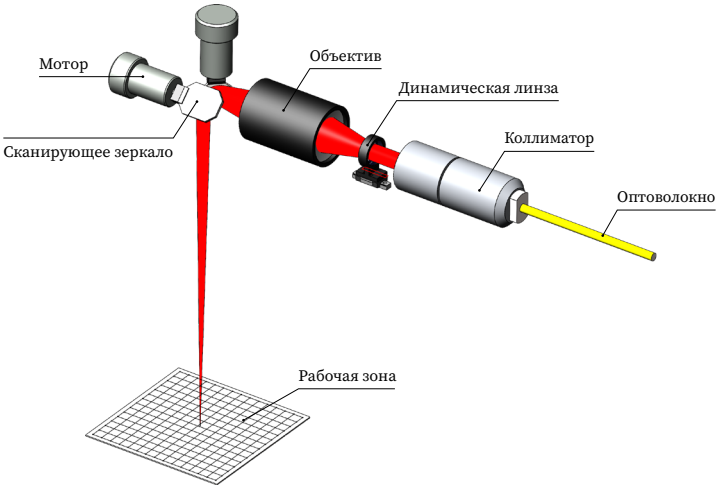
2.2 Определение параметров системы

Чаще всего для сканирования поля используются зеркала, закрепленные на валах гальванических двигателей постоянного тока с ограниченным углом поворота, поскольку такие системы имеют невысокую себестоимость, просты в управлении и обеспечивают высокую скорость сканирования и точность позиционирования [7]. Оптические системы по методу работы разделяются на системы пре- и постобъективного сканирования[2] [8], иначе говоря, на двух- и трехосевые сканирующие системы соответственно. Последние обеспечивают возможности работы системы на большом размере поля, изменения рабочего расстояния и гибкой настройки фокусировки [9, 10], однако подразумевают наличие дополнительных модулей в конструкции и имеют более сложное программное обеспечение для динамической фокусировки.

Схема типичной трехосевой системы представлена на рис. 2. Трехосевая сканирующая система включает в себя коллимирующую и фокусирующую

Рис. 2
Схема трехосевой сканирующей системы

Fig. 2
Three-axis scanning system diagram



2 Юревич В.И. Оптика лазерных технологических установок: движение к совершенству // РИТМ машиностроения. 2019. № 3. С. 14–19.

оптические системы. В их составе имеется подвижный компонент, управление которым осуществляется программой, а также сканирующая система в виде двух зеркал, закрепленных на валах гальвомоторов и расположенных после фокусирующей системы.

Анализ современного рынка трехосевых сканирующих систем[3,4,5,6,7,8] позволяет выделить их основные характеристики, которые можно разделить на габаритные (размер поля, рабочее расстояние и углы сканирования); оптические (размер пятна, мощность, апертура зеркал и пропускание системы); динамические (скорости сканирования, позиционирования); характеристики точности и стабильности (разрешение позиционирования, повторяемость, дрейф), эксплуатационные (габаритные размеры, масса и общая конфигурация системы).

Основываясь на выделенных характеристиках, можно сформулировать перечень основных требований к проектированию сканирующих систем:

- габариты рабочей зоны;
- диаметр пятна в рабочей плоскости;
- динамические характеристики;
- мощность используемого лазерного источника;
- массогабаритные параметры и общая конфигурация.

В соответствии с проведенным анализом сформулирован перечень параметров (табл. 1).

Таблица 1
Перечень параметров сканирующей системы

Table 1
List of scanning system parameters

Параметр	Значение
Размер пятна по уровню энергии $1/e^2$, мкм	не более 70
Позиционная повторяемость, мкрад	не более 5
Скорость сканирования, рад/с	не менее 20
Мощность рабочего излучения, Вт	не менее 1000

При разработке любой системы необходимо стремиться к уменьшению габаритных размеров и массы изделия. Современная тенденция в проектировании SLM-установок строится на размещении большого количества сканирующих лазерных систем (от 64 и более) в составе одной установки[9]. Классическая компоновка с использованием горизонтального ввода излучения не позволяет размещать такое количество систем над рабочим полем, т. к. представляет собой прямую оптическую ось, параллельную горизонту, которая ломается только после достижения зеркальной системы, что максимально увеличивает площадь основания. Кроме того, горизонтальное подключение оптического волокна, электрических кабелей и трубок охлаждения требует дополнительного пространства в аддитивных установках и препятствует размещению сканирующей системы по центру поля внутри таких же систем. Вертикальная компоновка выступает решением, в котором лазерное излучение вводится сверху вдоль вертикальной оси и поворачивает горизонтально перед зеркальной системой, частично или полностью проходя через фокусирующую систему. Преимуществом такой

3 SCANLAB GmbH: официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.scanlab.de (дата обращения: 12.01.2025).

4 Cambridge Technology Product Brand // Novanta Inc.: официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://novanta.com/precision-manufacturing/faqs/cambridge-technology-product-brand (дата обращения: 12.01.2025).

5 RAYLASE GmbH: официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.raylase.de/en (дата обращения: 12.01.2025).

6 Scanner Optics Co., Ltd.: официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.scanneroptics.com (дата обращения: 12.01.2025).

7 Aerotech, Inc.: официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.aerotech.com (дата обращения: 12.01.2025).

8 Sino-Galvo Technology Co., Ltd.: официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://sinogalvo.com (дата обращения: 12.01.2025).

9 Eplus3D Tech: официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.eplus3d.com (дата обращения: 12.01.2025).

компоновки является минимальная площадь основания сканирующей системы и вертикальный подвод каналов, что позволяет разместить над рабочим полем максимальное количество систем вплотную друг к другу.

2.3 Проектирование зеркальной системы

Чтобы обеспечить максимальную динамику поворота и точность позиционирования зеркальной сканирующей системы, следует предельно уменьшить массу и габариты зеркал для снижения инерции [11, 12]. В трехосевых системах при проектировании зеркал необходимо учитывать диаметр и сходимость лазерного излучения, которое выходит из объектива[10]. На размер зеркал сильное влияние оказывает расстояние от объектива до зеркальной поверхности и расстояние между зеркалами X и Y, при этом пятно на отражающей поверхности будет иметь форму деформированного эллипса (рис. 3) с различными полуосями, поскольку излучение является сходящимся. При проектировании первоначально необходимо оценить размеры отражающей поверхности, исходя из размеров пятен, а для оптимизации работы зеркал требуется рассчитать смещение оси их вращения.

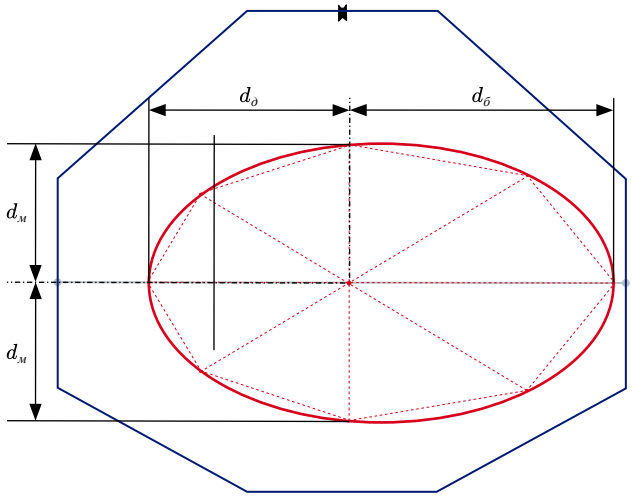
Оценка габаритов зеркала и его расположения относительно последней линзы объектива проводится путем расчета полуосей пятен.

На рис. 4 представлена схема определения размера пятна на зеркале X.

Рис. 3
Расположение пятен на зеркалах X и Y в трехосевой системе

Fig. 3
Spots location on the X- and Y-mirrors in a three-axis system

Пятно излучения на зеркале *X* в максимальном размере / Spot on *X*-mirror at maximum size



Пятна излучения на зеркале *Y* во всем диапазоне поворота зеркала *X* / Spots on *Y*-mirror in the entire range of *X*-mirror rotation

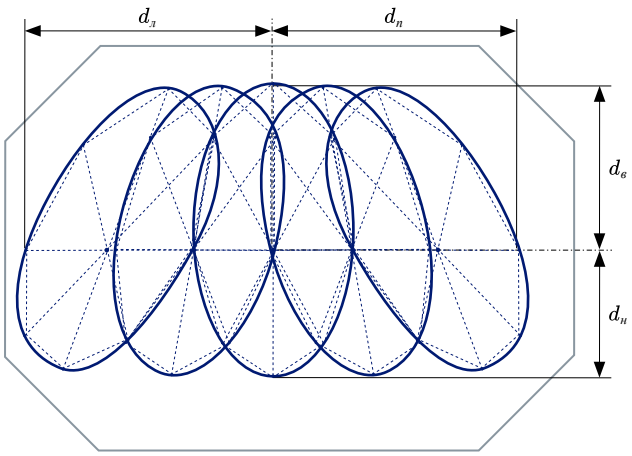
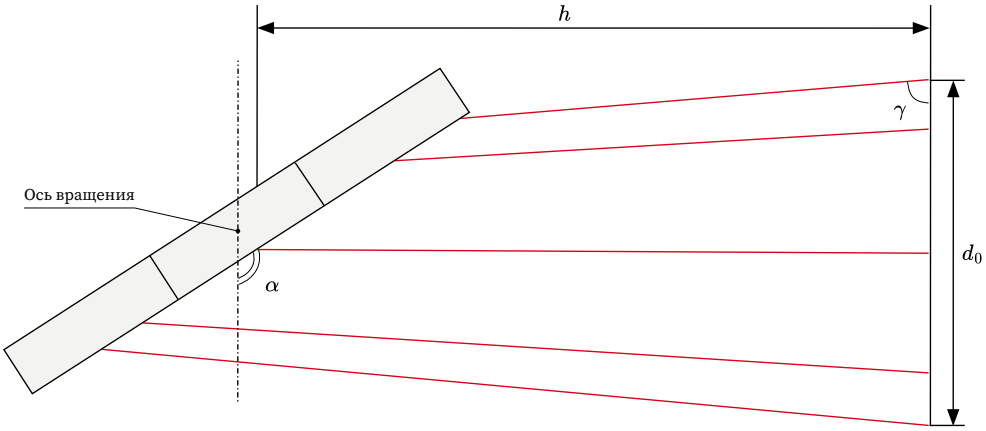


Рис. 4
Схема падения излучения на зеркало X

Fig. 4
Schematic illustration of ray path incident on the X-mirror



10 Marshall G., Stutz G. Handbook of Optical and Laser Scanning. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2012. 751 p.

Длины полуосей эллипса в таком случае рассчитываются следующим образом:

$$d_б = \left(d_0 - \frac{h}{\mathrm{tg}(\gamma)}\right) \times \frac{\sin(180-\gamma)}{\sin(\gamma-\alpha)}, \quad (1)$$

$$d_д = \left(d_0 - \frac{h}{\mathrm{tg}(\gamma)}\right) \times \frac{\sin(\gamma)}{\sin(180-\gamma-\alpha)}, \quad (2)$$

$$d_м = \frac{d_0}{2} - \frac{h}{\mathrm{tg}(\gamma)}, \quad (3)$$

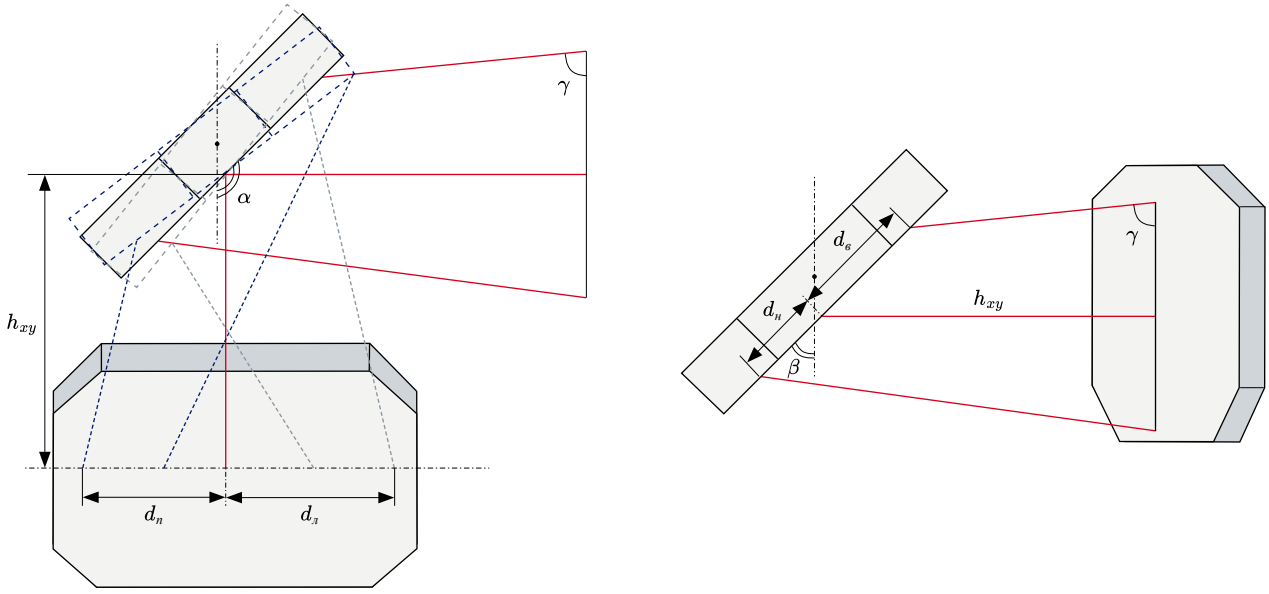
где $d_б$, $d_д$, $d_м$ — большие (ближняя, дальняя) и малая полуоси пятна соответственно;
d_0 — диаметр излучения на выходе из объектива;
h — расстояние от объектива до плоскости зеркала по оси излучения;
γ — угол между плоскостью выхода излучения и крайними лучами излучения;
α — угол между плоскостью выхода излучения и зеркалом.

Для оценки габаритов зеркала Y необходимо определить четыре отрезка $d_л$, $d_п$, $d_в$, $d_н$, которые включают габариты и размах перемещения пятна излучения по отражающей поверхности. Отрезки $d_л$ и $d_п$ будут зависеть от размеров больших полуосей пятна на зеркале X и угла α поворота зеркала X, в то время как оси $d_в$ и $d_н$ — от размеров малых полуосей пятна на зеркале X и угла β поворота зеркала Y. Все отрезки также будут зависеть от расстояния между зеркалами h_{xy} и угла γ схождения излучения.

Схема падения излучения на зеркало Y представлена на рис. 5.

Рис. 5
Схема падения излучения на зеркало *Y*

Fig. 5
Schematic illustration of ray path incident on the *Y*-mirror



Согласно представленной схеме, необходимые отрезки будут определяться следующим образом:

$$d_л = d_б(\cos\alpha + \sin\alpha \times \mathrm{tg}(2\alpha - 90^\circ - \gamma)) + h_{xy} \times \mathrm{tg}(2\alpha - 90^\circ - \gamma), \quad (4)$$

$$d_п = d_д \times \cos\alpha + \left(h_{xy} - d_д \sin\alpha\right) \times \mathrm{tg}(90^\circ - 2\alpha - \gamma), \quad (5)$$

$$d_в = \frac{d_м - h_{xy}\ \mathrm{tg}\ \gamma}{\cos\beta - \sin\beta\ \mathrm{tg}\ \gamma}, \quad (6)$$

$$d_н = \frac{d_м - h_{xy}\ \mathrm{tg}\ \gamma}{\cos\beta + \sin\beta\ \mathrm{tg}\ \gamma}. \quad (7)$$

Стоит отметить, что для расчета $d_л$ и $d_п$ необходимо брать максимальные углы размаха зеркала X в обе стороны от центрального положения, а для $d_в$ и $d_н$ следует использовать только один угол отклонения зеркала Y, когда оно максимально наклонено в сторону зеркала X.

Учитывая значения толщины зеркал S_x и S_y, а также неравномерность осей пятна излучения, для оптимизации габаритов зеркал X и Y следует сместить

оси вращения относительно оси излучения на величины d_x и d_y соответственно. Такие смещения аналитически определяются согласно следующим выражениям:

$$d_x = \frac{d_б - d_д}{2} \sin\alpha + \frac{S_x}{2} \cos\alpha, \quad (8)$$

$$d_y = \frac{d_в - d_н}{2} \cos\beta + \frac{S_y}{2} \sin\beta. \quad (9)$$

В зеркальных сканирующих лазерных системах к качеству отражающей поверхности зеркал предъявляются повышенные требования, т. к. отклонение формы их поверхности приводит к значительному увеличению аберраций из-за их удвоения на отражающей поверхности. Обычно для зеркал лазерных сканирующих систем отклонение от плоскостности поверхности детали составляет $\lambda/4$ – $\lambda/2$ (т. е. не более 266–532 нм в рабочей области зеркала для длины волны 1064 нм). Необходимо обеспечить момент инерции зеркала относительно оси вращения менее чем 3000 г×мм^2 для оптимальных динамических характеристик[11].

На форму отражающей поверхности зеркал, помимо погрешностей изготовления, оказывают влияние внешние факторы, такие как сила тяжести, динамические нагрузки, а также нагрев при поглощении лазерного излучения. Выбор материала, габаритных размеров и формы зеркал во многом зависит именно от этих факторов.

Для примера были взяты конструкции сканирующих зеркал конечных размеров различной толщины (зеркало X — 40×56 мм, зеркало Y — 70×46 мм). В качестве материалов зеркал были рассмотрены КУ-1 (плавленый кварц), Si (монокристаллический кремний), SiC (карбид кремния), АД33 (алюминиевый сплав).

Воздействие силы тяжести на отражающую поверхность зеркала X пренебрежительно мало, т. к. обычно эти зеркала располагаются вертикально. В связи с этим необходимость рассматривать влияние данного фактора на разные конфигурации отсутствует. Однако положение отражающей поверхности зеркала Y при сканировании постоянно изменяется относительно горизонта. Для его расчета следует использовать положение, при котором отражающая поверхность больше всего подвержена силе тяжести (наиболее близкое к параллельности с горизонтом). Необходимое положение для расчета составило 35° при амплитуде ±10° относительно центрального положения. Результаты расчетов, приведенные в табл. 2, позволяют сделать вывод о том, что добиться удовлетворительных показателей уменьшением толщины зеркал невозможно. Характеристики материалов АД33 и КУ-1 не позволяют достичь оптимальных показателей, поэтому далее будут рассматриваться только кремний и карбид кремния.

Таблица 2
Результаты воздействия силы тяжести на зеркало Y с толщиной 3 и 4 мм

Table 2
The effects of gravity on mirror Y at thicknesses of 3 mm and 4 mm

Материал	Толщина, мм	Деформация отражающей поверхности, нм	Масса зеркала, г	Момент инерции, г×мм^2
АД33 (алюминий)	5	315	38,9	6027
	4	481	31,1	4798
	3	832	23,3	3585
Si (кремний)	5	142	32,1	4982
	4	216	25,7	3966
	3	375	19,3	2963
SiC (карбид кремния)	5	76	45,9	7117
	4	115	36,7	5666
	3	201	27,5	4233
	2,5	285	23,0	3522
КУ-1 (плавленый кварц)	5	338	31,7	4915
	4	517	25,4	3913
	3	897	19,0	2923

11 Scanner Optics Co., Ltd: официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.scanneroptics.com (дата обращения: 12.01.2025).

Расчет деформации поверхности зеркал под воздействием динамических нагрузок проводился при значении углового ускорения 10 000 рад/с^2, которое может достигаться при использовании гальвомоторов и является типичным для сканирующих систем, используемых в аддитивных установках. На рис. 6 показан характер деформации отражающей поверхности зеркал. В табл. 3 приведены данные расчета результирующего влияния силы тяжести и углового ускорения на зеркала *X* и *Y* толщиной 4 мм.

Рис. 6
Характер деформации отражающей поверхности зеркал *X* и *Y* под действием силы тяжести и ускорения / торможения

Fig. 6
Deformation pattern of the reflective surfaces of mirrors *X* and *Y* due to gravity and acceleration / braking

Условные обозначения

области с наибольшей по модулю деформацией

область с наименьшей по модулю деформацией

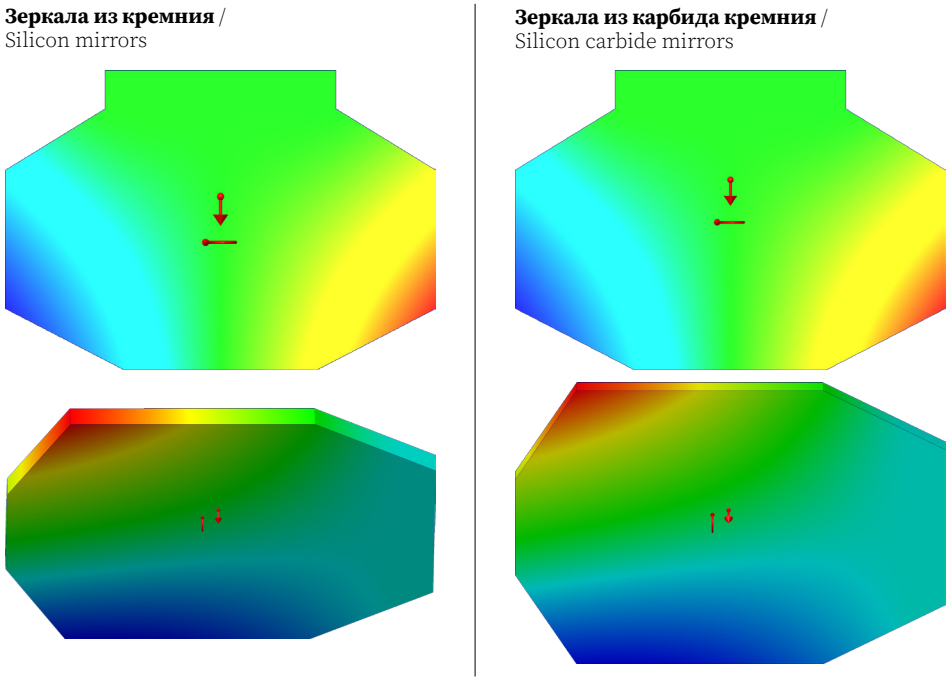


Таблица 3
Результирующее влияние силы тяжести и углового ускорения на зеркала *X* и *Y* с толщиной 4 мм

Table 3
The impact of gravity and acceleration on 4 mm *X*- and *Y*-mirrors

Материал	Зеркало	Деформация отражающей поверхности, нм	Масса зеркала, г	Момент инерции, г×мм^2
Si (кремний)	*X*	366	16,4	3456
	Y	926	25,7	3966
SiC (карбид кремния)	*X*	196	23,4	4937
	Y	495	36,7	5666

Полученные результаты показывают, что необходима дальнейшая оптимизация конструкции зеркал. Следующим этапом является облегчение конструкции в краевых зонах добавлением фасок для постепенного уменьшения толщины от оси вращения к краю зеркала. Для анализа были взяты два варианта последовательного добавления фасок (рис. 7). В процессе расчета были рассмотрены зеркала разной толщины. Характер распределения деформации при добавлении фасок не отличался от представленного на рис. 6. Результаты расчетов приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4
Результаты расчета воздействия на зеркала *X* при добавлении фасок

Table 4
The impact of the combined effect on *X*-mirrors with chamfers

Материал	Толщина зеркала, мм	Вариант фаски	Деформация отражающей поверхности, нм	Масса зеркала, г	Момент инерции, г×мм^2
Si (кремний)	4	Боковая	282	14,4	2355
		Краевая	296	12,0	2096
SiC (карбид кремния)	4	Боковая	150	20,5	3365
		Краевая	160	17,2	2994
	3	Боковая	246	15,2	2384
		Краевая	256	12,3	2080

Таблица 5
Результаты расчета воздействия на зеркала *Y* при добавлении фасок

Table 5
The impact of the combined effect on *Y*-mirrors with chamfers

Материал	Толщина зеркала, мм	Вариант фаски	Деформация отражающей поверхности, нм	Масса зеркала, г	Момент инерции, г×мм^2
Si (кремний)	4	Боковая	900	20,8	2342
		Краевая	895	18,3	2195
	5	Боковая	629	27,2	3351
		Краевая	640	24,75	3200
SiC (карбид кремния)	4	Боковая	480	29,7	3346
		Краевая	479	26,0	3137
	3	Боковая	792	21,7	2305
		Краевая	784	18,8	2133

Рис. 7
Изображение конструктивного исполнения зеркал *X* и *Y* после двух последовательных добавлений фасок

Fig. 7
Structural design of mirrors *X* and *Y* after two chamfering steps

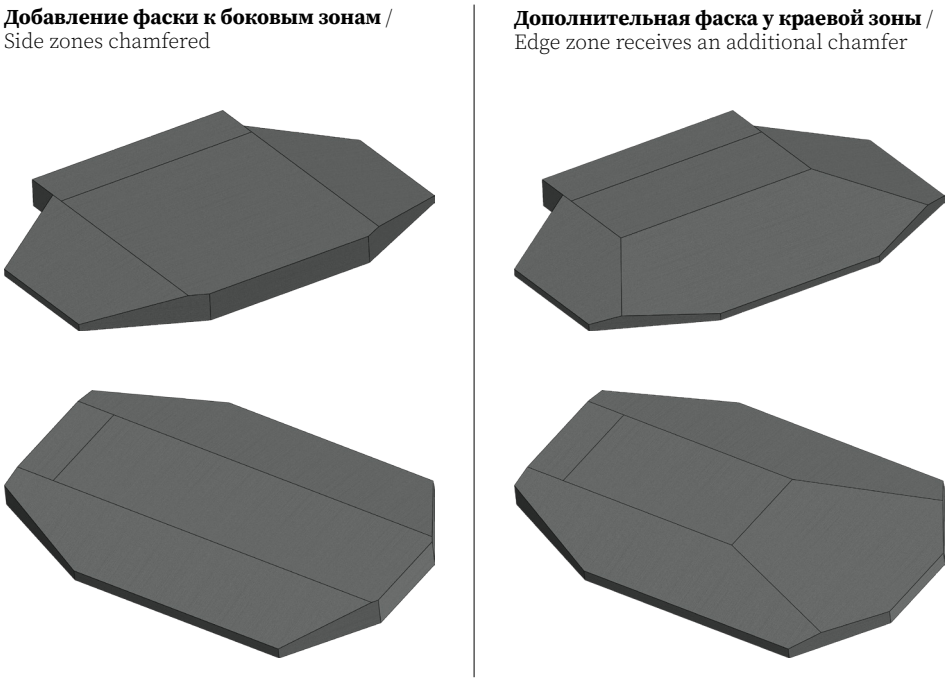


Рис. 8
Результаты деформации отражающей поверхности в площади пятен лазерного излучения в краевых зонах зеркала *Y* из кремния с боковыми фасками

Fig. 8
Deformation effects on the reflective surface within laser spot areas at the edges of silicon mirror *Y* (featuring beveled sides)

Отметим, что для зеркала *Y* стоит учитывать перемещение пятна по отражающей поверхности, поэтому целесообразно рассмотреть деформации в окрестности пятна в двух его крайних положениях. Пример приведен на рис. 8, результаты расчетов — в табл. 6.

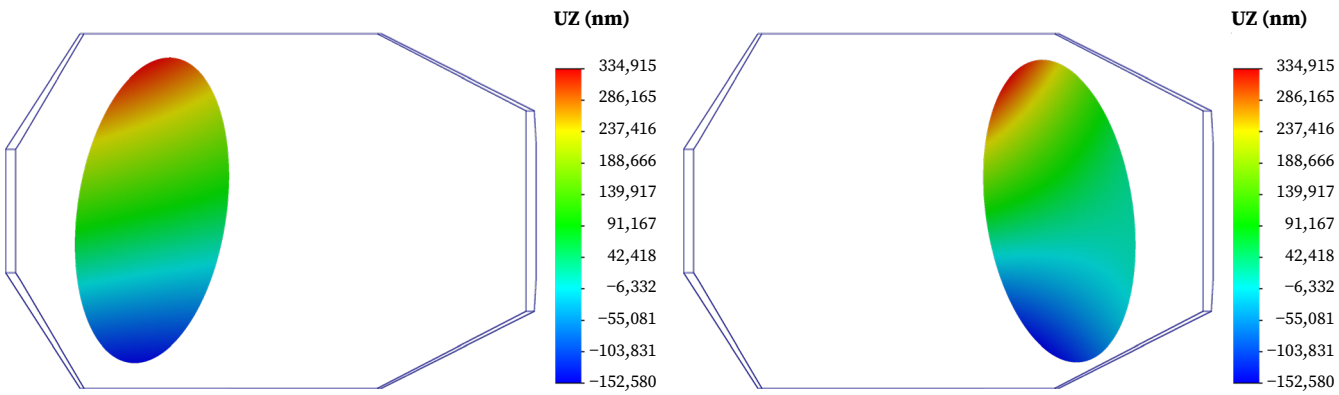


Таблица 6
Результаты расчетов деформации отражающей поверхности зеркала *Y* в площади пятен лазерного излучения в краевых зонах

Table 6
Deformation of *Y*-mirror reflective surface in the edge zones

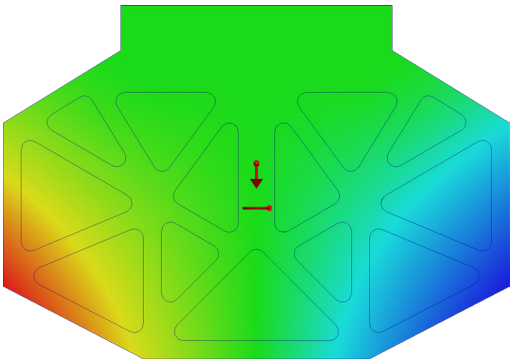
Материал	Толщина зеркала, мм	Вариант фаски	Деформация отражающей поверхности, нм	
			слева	справа
Si (кремний)	5	Боковая	488	225
		Краевая	485	216
SiC (карбид кремния)	4	Боковая	398	167
		Краевая	361	153

Более высокая степень оптимизации зеркал достигается путем выполнения большего количества выборок в детали с добавлением ребер жесткости. Результаты анализа деформации зеркал с различными выборками приведены на рис. 9, результаты расчетов — в табл. 7 и 8.

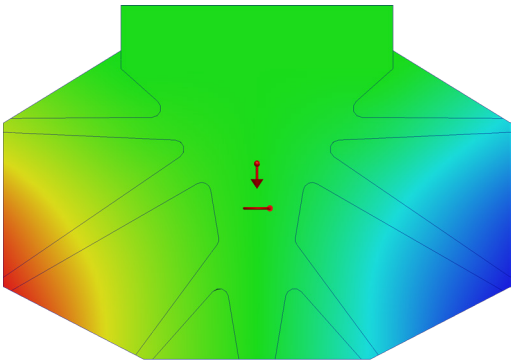
Рис. 9
Деформация отражающей поверхности зеркал из кремния с различным конструктивным исполнением

Fig. 9
Deformation of reflective surfaces of silicon mirrors in various structural configurations

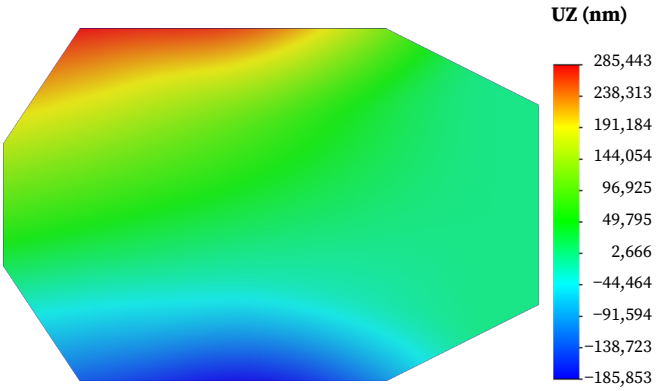
Выборка для зеркала *X* (вариант 1) /
Grooves of the *X*-mirror (variant 1)



Выборка для зеркала *X* (вариант 2) /
Grooves of the *X*-mirror (variant 2)



Выборка для зеркала *Y* (общая деформация) /
Y-mirror grooves (general deformation)



Выборка для зеркала *Y* (левый край) /
Y-mirror grooves (left edge)

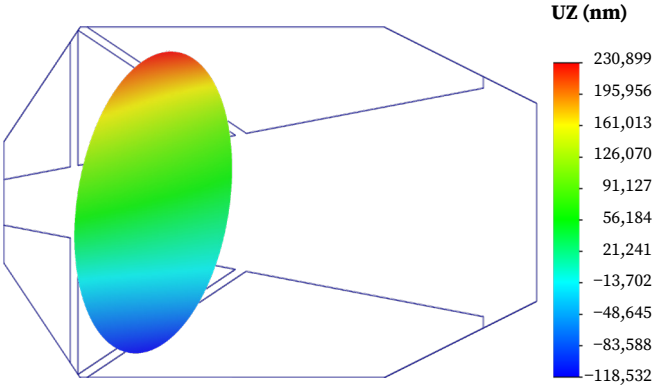


Таблица 7
Результаты расчета воздействия на зеркала *X* при добавлении выборок

Table 7
The impact of the combined effect on *X*-mirrors with grooves

Вариант выборки	Отклонение от оси вращения, мм	Деформация отражающей поверхности, нм	Масса зеркала, г	Момент инерции, г×мм^2
1	0,25	490	10,9	2241
2	0,32	416	9,9	1500

Таблица 8
Результаты расчета воздействия на зеркало *Y* при наличии выборки

Table 8
The impact of the combined effect on *Y*-mirror with grooves

Зона деформации	Деформация отражающей поверхности, нм	Масса зеркала, г	Момент инерции, г×мм^2
Общая	471	19,0	1663
Левый край	349		

2.4 Математическая модель управления модулем фокусировки

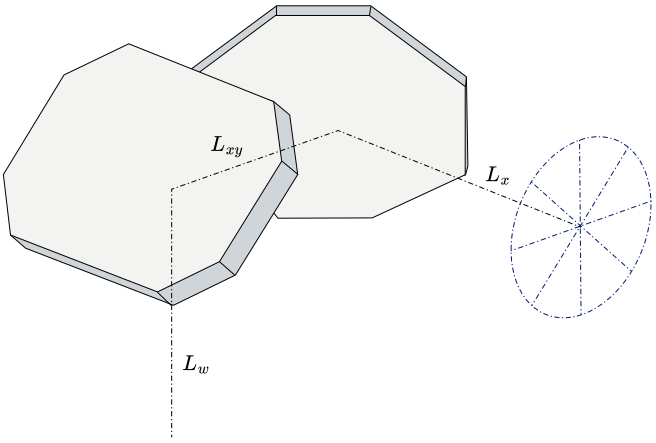


Рис. 10
Схема для расчета длины пути осевого луча

Fig. 10
Schematic for determining the axial ray path length

Другой важной особенностью проектирования трехосевых сканирующих систем является разработка системы динамической фокусировки. Для реализации управления модулем фокусировки необходимо знать:

- расстояние, которое проходит луч от объектива до конкретной точки рабочего поля, с учетом прохождения через систему сканирующих зеркал конечной толщины;
- зависимость заднего фокального отрезка объектива от положения подвижного компонента системы.

Расчет длины пути осевого пучка в двухзеркальной сканирующей системе осуществляется разбиением этой длины на три части (рис. 10).

Общая длина пути осевого луча:

10
$$L = L_x + L_{xy} + L_w,$$

где L_x — расстояние от последней поверхности объектива до поверхности зеркала X;
L_{xy} — расстояние от поверхности зеркала X до поверхности зеркала Y;
L_w — расстояние от поверхности зеркала Y до рабочего поля.

Каждый из отрезков пути зависит от исходного положения и угла поворота зеркала относительно первоначального положения, в котором зеркала расположены под углом 45° относительно плоскости падающего центрального луча. Рассмотрев каждую составляющую выражения (10) по отдельности с учетом конечной толщины зеркал и смещения плоскости оси вращения относительно центрального пучка, получим общее выражение для нахождения длины пути

11
$$L(\alpha,\beta) = L_0 + \frac{2\Delta x\cos\alpha - S_x}{\sin\alpha} + \frac{2L_{0xy}\cos\beta + 2\Delta y\sin\beta - S_y}{4\cos\beta\sin\alpha\cos\alpha} + \frac{L_{w0}}{4\sin\beta\cos\beta\sin\alpha\cos\alpha},$$

где Δx и Δy — смещение плоскостей осей вращения зеркал X и Y относительно центрального пучка;
α и β — углы между осью падения излучения и поверхностями зеркал X и Y соответственно;
ΔS_x и ΔS_y — изменения расстояний с учетом толщин S_x и S_y зеркал X и Y;
L_0 — нормальное расстояние от последней поверхности объектива до оси вращения зеркала X;
L_{0xy} — нормальное расстояние от оси вращения зеркала X до оси вращения зеркала Y;
L_{w0} — нормальное расстояние от оси вращения зеркала Y до рабочего поля.

Расчет заднего фокального отрезка системы, который зависит от положения подвижного компонента, осуществляется путем расчета хода апертурного луча оптической системы без учета зеркал. Общий вид оптической системы в тонких компонентах приведен на рис. 11.

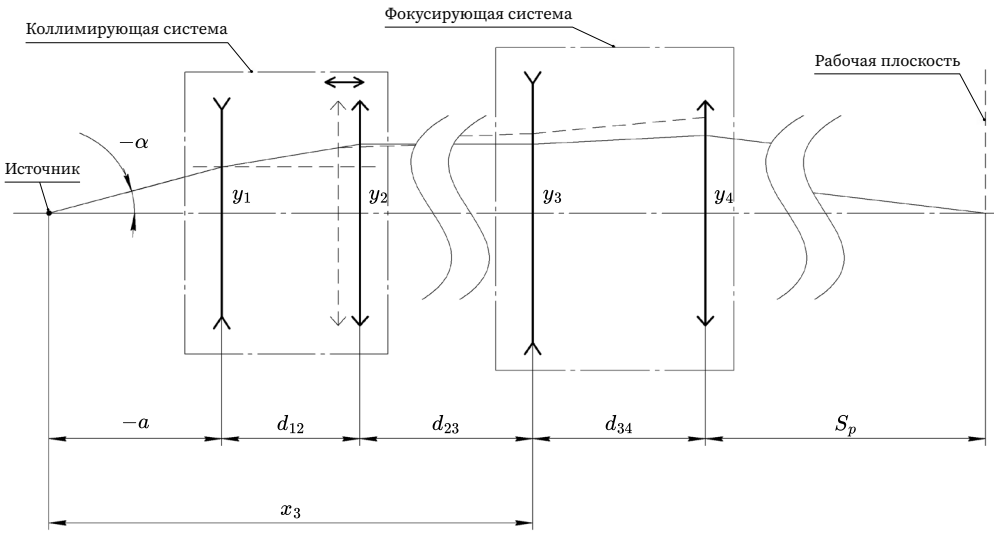
В результате расчета было получено параметрическое выражение вида

12
$$S_p(d_{12}) = k_1 d_{12}^2 + k_2 d_{12} + k_3,$$

где d_{12} — расстояние между первым и вторым компонентом оптической системы;
S_p — задний фокальный отрезок;
k_1, k_2, k_3 — константы, определяемые параметрами оптической системы.

Рис. 11
Общий вид оптической системы

Fig. 11
Diagram of optical system in thin components



Зачастую значение константы k_1 является пренебрежительно малым, в таком случае выражение (12) принимает вид

13 $$S_p(d_{12}) = k_2 d_{12} + k_3.$$

Необходимое значение S_p будет равным пути пучка L, описанному выражением (11), тогда положение динамического компонента в общем виде выражается как

14 $$d_{12}(S_p) = \frac{L(\alpha,\beta,)-k_3}{k_2}.$$

Перемещение динамического компонента осуществляется при помощи гальвомотора с передаточным механизмом, который обеспечивает преобразование углового перемещения в линейное, как показано на рис. 12 [13]. Параметры, отмеченные на схеме, определяются конструктивно, их значения либо известны, либо могут быть измерены с учетом погрешности сборки.

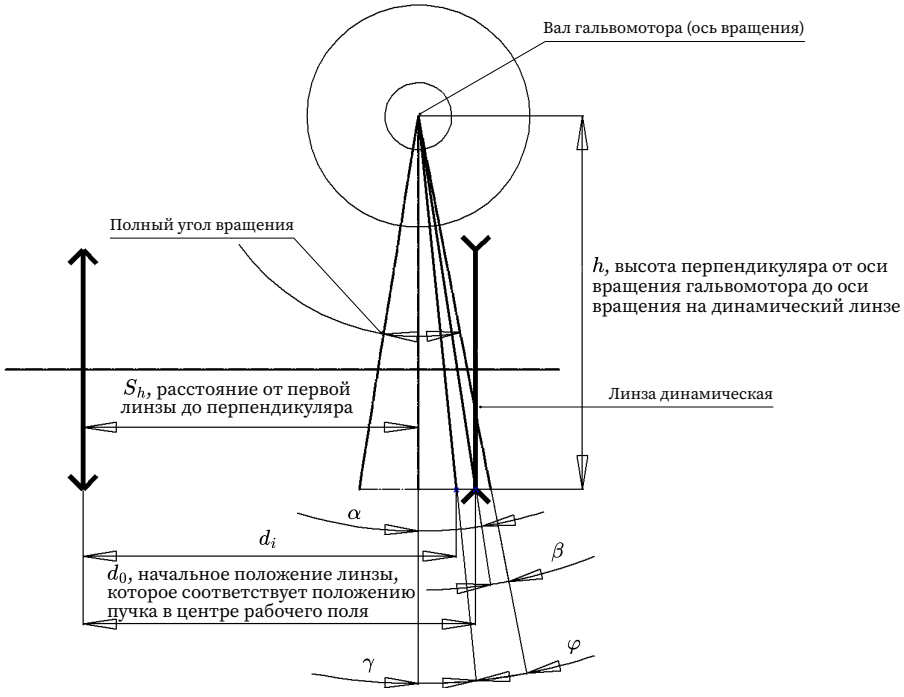


Рис. 12
Схема узла динамического перемещения линзы с использованием гальвомотора

Fig. 12
Schematic of the lens dynamic positioning using a galvo motor

Амплитуда вращения вала гальвомотора строго ограничена, и весь ее размах соответствует максимальному разрешению используемого аналого-цифрового преобразователя. Например, при полной амплитуде поворота в 20° и максимальном разрешении датчика угла поворота 16 бит угол поворота в 1° будет равен примерно 3277 точкам. Кроме того, стоит отметить, что в одном крайнем положении значение будет равно 0, а в другом — 65 536. Чтобы задать необходимое положение динамической линзы d_i, необходимо определить значение в точках датчика угла поворота

15 $$b_i = \varphi\frac{2^{16}}{20} = (\beta + \alpha - \gamma) \times \frac{2^{16}}{20},$$

где α — угол между перпендикуляром динамического угла и положением линзы при расстоянии d_0;
φ — угол приращения от крайнего (нулевого) положения;
β — угол между крайним положением и положением линзы при расстоянии d_0;
γ — угол между перпендикуляром динамического угла и положением линзы при расстоянии d_i.

Подставляя значения углов, определенные аналитически, в выражение (15), получим

16 $$b_i = \left(\beta + \operatorname{arctg}\left[\frac{d_0 - S_h}{h}\right] - \operatorname{arctg}\left[\frac{d_i - S_h}{h}\right]\right) \times \frac{2^{16}}{20}.$$

3 Результаты и обсуждение

По результатам исследования были определены требуемые параметры сканирующей системы, обеспечивающие наилучшее качество изготовления изделий методом SLM. Обоснована необходимость проектирования сканирующей системы вертикальной компоновки.

В рамках исследования предложен метод проектирования сканирующих систем, который включает в себя аналитические зависимости длины оптического пути от углов поворота зеркал, заднего фокального расстояния — от положения динамической линзы, обеспечивающие точное управление фокусным расстоянием, что позволяет достигать равномерности диаметра пятна лазерного излучения по всему рабочему полю.

В рамках разработки метода проектирования приведены аналитические выражения для оценки габаритов сканирующих зеркал, включающие выражения для определения размеров полуосей эллиптических пятен, падающих на зеркала, и величины смещения осей вращения зеркал относительно оси излучения.

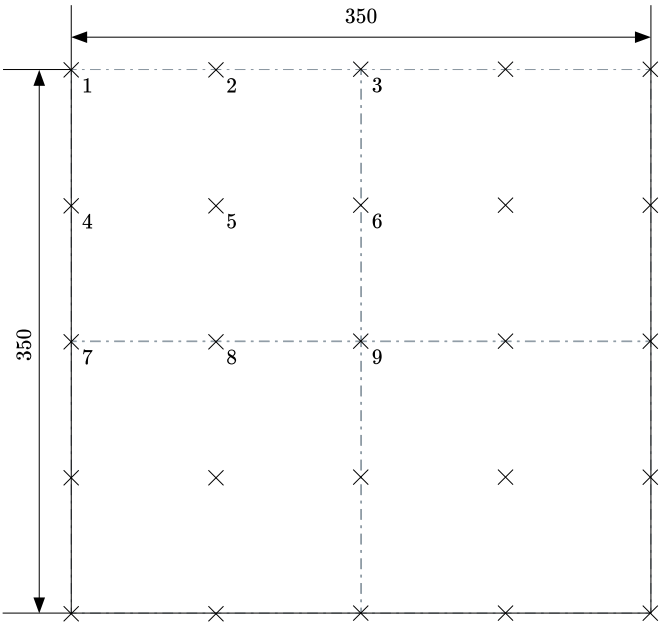
На начальном этапе анализа прочности конструкции под действием силы тяжести и динамических нагрузок было выявлено, что наиболее предпочтительными материалами зеркал являются монокристаллический кремний и карбид кремния.

При воздействии ускорения / торможения зеркала испытывают наибольшую нагрузку на краевые участки поверхности относительно оси вращения. Уменьшение толщины зеркал не позволяет добиться удовлетворительных параметров, из-за чего необходима дальнейшая оптимизация их конструкции. В качестве более оптимальной формы рассматривались конструкции с добавлением боковых фасок и комбинацией боковых и дополнительной краевой фасок. Это позволило получить удовлетворительные значения массы и момента инерции при допустимых значениях деформации отражающей поверхности для зеркал из кремния и карбида кремния.

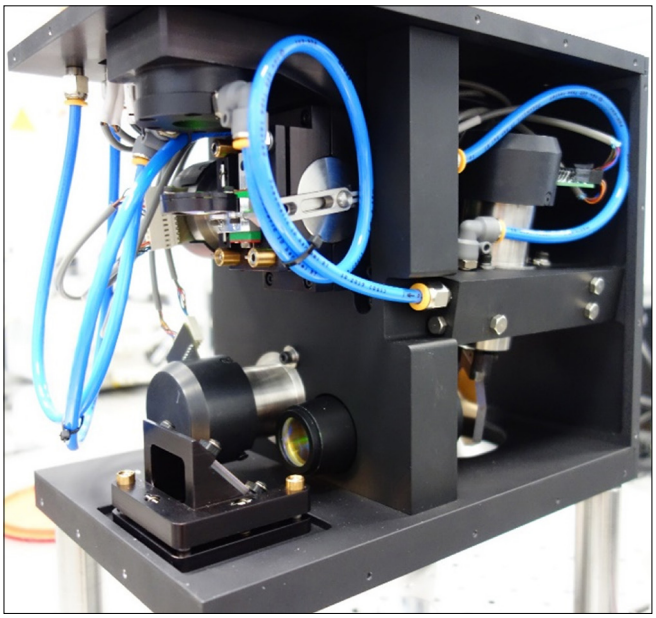
Анализ конструкций с использованием выборок показал, что такие зеркала обладают наилучшими значениями массы и моментов инерции при относительно невысокой деформации поверхности. Однако стоит отметить, что изготовление зеркал с такими выборками является технологически более сложным,

Рис. 13
Трехосевая сканирующая система и схема точек
Fig. 13
Three-axis scanning system and point pattern

Схема точек поля для определения качества пятна /
Field point pattern for spot quality analysis



Трехосевая сканирующая лазерная система (фото И.С. Шарапова) / Three-axis scanning laser system (photo by Ilya S. Sharapov)



что увеличивает себестоимость и время изготовления, поэтому их использование нерационально. Наиболее предпочтительной формой является конструкция с боковыми фасками, т. к. технологический процесс их изготовления значительно проще.

Полученные аналитические выражения (11), (14) и (16) определяют общую математическую модель управления блоком фокусировки сканирующей лазерной системы в зависимости от углов поворота сканирующих зеркал, которые задаются путем вычисления конкретной координаты на рабочей плоскости. Постоянные величины модели определяются параметрами системы.

В соответствии с определенными требованиями и изложенными выше положениями был проведен синтез оптических компонентов на основе общего вида системы, представленного на рис. 11, разработаны общая конструкция и все узлы сканирующей системы, изготовлена трехосевая сканирующая лазерная система (рис. 13).

После изготовления и сборки системы проводится ее настройка и исследование параметров (оценка габаритов рабочего поля, настройка управления подвижным компонентом, настройка управления сканирующими зеркалами, оценка качества фокусировки и оценка влияния лазерного излучения на сканирующую систему) [14–17].

Оценка качества пятна проводится в соответствии с типовыми точками 1, 3, 5, 9 (рис. 13).

Полученные результаты (табл. 9, рис. 14) показывают, что диаметры фокальных пятен удовлетворяет требованиям, сформулированным как значения не более 70 мкм.

На основе оценки влияния лазерного излучения на размер фокального пятна построен график зависимости размера пятна от времени воздействия лазерного излучения различной мощности (рис. 15), который показывает, что размер пятна значительно возрастает с течением времени при высокой мощности излучения. Такое явление может существенно повлиять на работу системы в целом, поэтому требует программной корректировки, осуществляемой на этапе настройки системы в составе установки.

После проведения исследования характеристик системы осуществляется ее внедрение в аддитивную установку с последующей настройкой. Так, изготовленная сканирующая система была интегрирована в состав экспериментальной аддитивной установки RusMelt300 производства ООО «Росатом Аддитивные технологии», работающей по технологии селективного лазерного плавления (рис. 16).

Таблица 9
Значения диаметров фокальных пятен
Table 9
Focal spot diameter values

Точка	Диаметр фокального пятна по уровню энергии $1/e^2$, мкм
1	67,5
3	64,1
5	66,9
9	63,2

Рис. 14
Фокальные пятна в типовых точках измерений

Fig. 14
Focal spots at standard measurement points

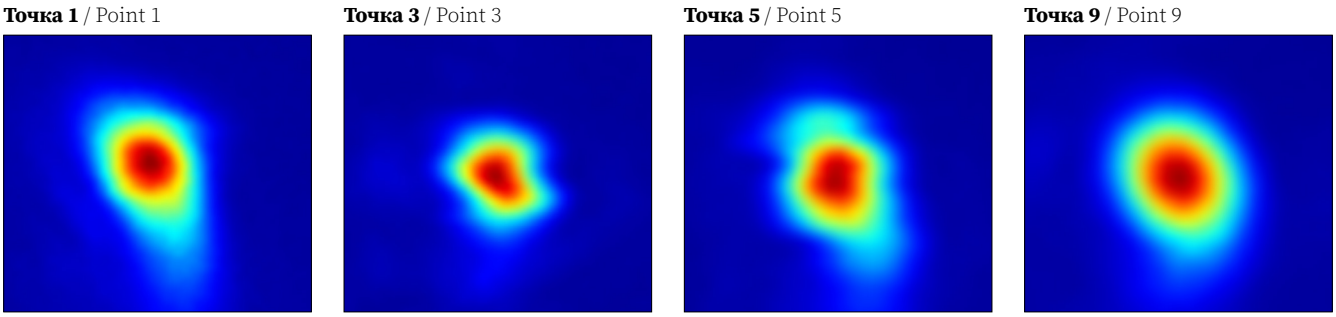


Рис. 15
График зависимости фокального пятна от времени воздействия лазерного излучения на различных уровнях мощности

Fig. 15
Focal spot vs. laser exposure time at different power levels

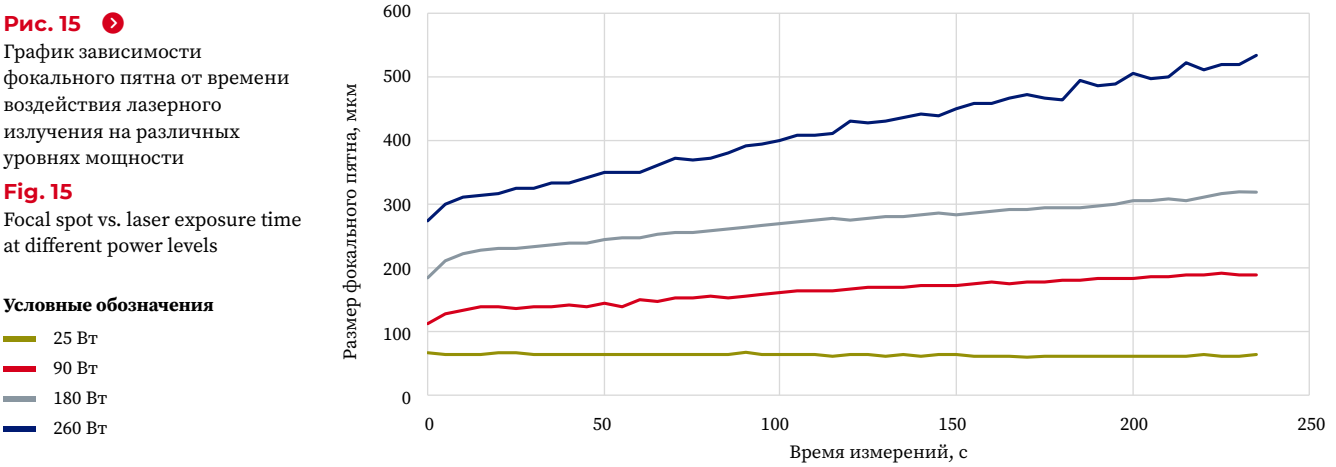
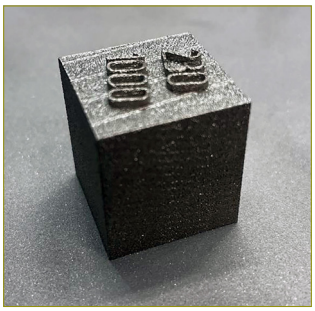


Рис. 16
Сканирующая система в составе установки RusMelt300 (фото И.С. Шарапова)

Fig. 16
Scanning system included in the RusMelt300 facility (photos by Ilya S. Sharapov)

Рис. 17
Напечатанный при помощи сканирующей системы тестовый образец (фото И.С. Шарапова)

Fig. 17.
A test sample printed using a scanning system (photo by Ilya S. Sharapov)



После монтажа системы была осуществлена печать пяти кубических образцов со стороной 20 мм из сферического порошка стали 12Х18Н10Т (рис. 17). Изготовленные образцы контролировались по своим размерам по сравнению с заданной 3D-моделью. Проведение контроля размеров по всем сторонам на всех образцах показало соответствие требуемым значениям со средней ошибкой не более ±0,08 мм.

Таким образом, была выполнена апробация разработанного метода проектирования, доказавшая свою работоспособность с помощью печати тестовых образцов на аддитивной установке посредством изготовленной сканирующей лазерной системы вертикальной компоновки.

4 Выводы

Приведенные в статье требования к сканирующим лазерным системам, входящим в состав SLM-установок, являются основополагающими при проектировании прибора и определяются условиями формирования изделия в процессе селективного лазерного плавления. Вертикальная компоновка, в отличие от традиционных схем, обеспечивает оптимальное соотношение рабочего поля и площади основания сканирующей системы, что в совокупности с вертикальным вводом излучения обеспечивает возможность кластеризации системы для увеличения производительности и рабочей зоны аддитивной установки.

В результате исследования сформулированы аналитические зависимости, позволяющие определить минимальные размеры отражающей поверхности сканирующих зеркал в трехосевой сканирующей системе с учетом особенностей их размещения и толщины.

В качестве материала сканирующих зеркал, оптимального для условий российской промышленности, целесообразно использовать кремний. При этом для снижения момента инерции наиболее рационально в конструкцию зеркал добавлять равносторонние фаски на тыльной стороне подложки. Такие материал и конструкция сканирующих зеркал представляются адаптированными к специфике высокоскоростного сканирования в условиях продолжительного теплового воздействия лазерного излучения высокой мощности, что обеспечивает необходимую жесткость и минимальные деформации отражающей поверхности.

Представлена математическая модель сканирующей лазерной системы вертикальной компоновки, включающая коллиматор с динамической линзой и фокусирующий объектив. Модель описывает:

- зависимость длины оптического пути лазерного пучка от углов поворота сканирующих систем;
- аналитическую связь заднего фокального отрезка с положением динамической линзы;
- алгоритм расчета положения динамической линзы для формирования управляющего сигнала фокусировки, обеспечивающего поддержание заданного диаметра пятна по всему рабочему полю.

благодарности

Авторы выражают благодарность руководству и сотрудникам ООО «Росатом Аддитивные технологии» за возможность апробации устройства и сотрудничество.

библиография

1. Galantucci L.M., Guerra M.G., Dassisti M., et al. Additive Manufacturing: New Trends in the 4th Industrial Revolution // Proceedings of the 4th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing. AMP 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer, 2019. P. 153–169. DOI:10.1007/978-3-030-18180-2_12.
2. Jemghili R., Ait Taleb A., Mansouri K. Additive Manufacturing Progress as a New Industrial Revolution // Proceedeengs of the 2020 IEEE 2nd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS). Kenitra: IEEE, 2020. P. 1–8. DOI:10.1109/ICECOCS50124.2020.9314623.
3. Фролова А.Б., Шигапов А.И. История, текущее состояние и перспективы развития аддитивных технологий // Научные известия. 2022. № 29. С. 198–201.
4. Финогеев Д.Ю., Решетникова О.П. Аддитивные технологии в современном производстве деталей точного машиностроения // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 3 (86). С. 63–71.
5. Yap C.Y., Chua C.K., Dong Z.L., et al. Review of Selective Laser Melting: Materials and Applications // Applied Physics Reviews. 2015. Iss. 2. P. 2–18. DOI:10.1063/1.4935926.
6. Yang P.M., Lo Y.L., Chang Y.H. Laser Galvanometric Scanning System for Improved Average Power Uniformity and Larger Scanning Area // Applied Optics. 2016. Vol. 55. Iss. 19. P. 5001–5007. DOI:10.1364/AO.55.005001.
7. Luo X., Li J., Lucas M. Galvanometer Scanning Technology for Laser Additive Manufacturing // Proceedings of SPIE. Laser 3D Manufacturing IV. San Francisco: SPIE, 2017. Vol. 10095. P. 1–8. DOI:10.1117/12.2252973.

8. Алексеева Е.М., Боршевников А.Н., Грибова Г.О. и др. Разработка гибридной сканирующей системы для установок селективного лазерного плавления // Приборы. 2023. № 6 (276). С. 26–34.
9. Godineau K., Lavernhe S., Tournier C. Calibration of Galvanometric Scan Heads for Additive Manufacturing with Machine Assembly Defects Consideration // Additive Manufacturing. 2019. Vol. 26. P. 250–257. DOI:10.1016/j.addma.2019.02.003.
10. Xiaoling S., Bin Z., Weihao X., et al. The Design of Laser Scanning Galvanometer System // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. San Francisco: SPIE, 2015. Vol. 9449. P. 2–9. DOI:10.1117/12.2082774.
11. Гилязов М.Р., Нагулин К.Ю., Гильмутдинов А.Х. Динамические характеристики гальванометрического сканатора для лазерной поверхностной обработки // Труды МАИ. 2018. № 101. С. 23.
12. Гридин В.М. Электромагнитные характеристики моментных бесконтактных двигателей постоянного тока // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2011. № 2 (83). С. 75–86.
13. Ho C.C., Liang Y.S. Research and Development of High-Speed Laser Scanning Galvanometer System // Smart Science. 2013. Vol. 1. Iss. 2. P. 82–85. DOI:10.6493/SmartSci.2013.153.
14. Metelkova J., Kinds Y., Kempen K., et al. On the Influence of Laser Defocusing in Selective Laser Melting of 316L // Additive Manufacturing. 2018. Vol. 23. P. 161–169. DOI:10.1016/j.addma.2018.08.006.
15. Putzer M., Zweifel M., Kneubuhler F., et al. Self-Optimizing Method and Software for Calibration and Mapping of a Laser System for Laser Machining // Optics and Lasers in Engineering. 2024. Vol. 178. P. 108245. DOI:10.1016/j.optlaseng.2024.108245.
16. Stubenvoll M., Mann K. Measurement and Compensation of Laser-Induced Wavefront Deformations and Focal Shifts in Near IR Optics // Optics Express. 2014. Vol. 22. Iss. 21. P. 25385–25396. DOI:10.1364/OE.22.025385.
17. Yeung H., Lane B., Donmez M., et al. In-Situ Calibration of Laser/Galvo Scanning System Using Dimensional Reference Artefacts // CIRP Annals. 2020. Vol. 69. Iss. 1. P. 441–444. DOI:10.1016/j.cirp.2020.03.016.

авторы

Шарапов Илья Сергеевич
АО «НИИ НПО „ЛУЧ“», Подольск, Россия
0009-0005-7449-6517

Верба Глеб Егорович
glebverba@mail.ru
АО «НИИ НПО „ЛУЧ“», Подольск, Россия

Поступила 08.05.2026. Принята к публикации 23.06.2026. Опубликована 30.06.2026.

UDC 535.8+681.7
DOI:10.30533/GiA-2026-031

CC BY

The Design of a Three-axis Laser Scanning System for Selective Laser Melting Systems: From Mirror Design to Dynamic Focus Calculation

Ilya S. Sharapov[1] ✉, **Gleb E. Verba**[1]

[1] LUCH Research and Production Association, Research and Development Institute, Joint Stock Company, Podolsk, Russia
✉ fds171@mail.ru

citation Sharapov IS, Verba GE. The Design of a Three-axis Laser Scanning System for Selective Laser Melting Systems: From Mirror Design to Dynamic Focus Calculation. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2026;70(3): 130–150. DOI:10.30533/GiA-2026-031.

keywords scanning mirror, scanning laser system, dynamic focusing system, mirror strength, selective laser melting, mirror design

abstract The article discusses design method for three-axis laser scanning systems tailored for integration into selective laser melting (SLM) setups, reflecting current industry trends. By analysing modern device specifications, we define core requirements for scanning systems, particularly focusing on optimal configurations for multi-laser source setups. Analytical relationships have been established to ensure minimal dimensions of the reflecting surface of scanning mirrors in a three-axis scanning system, taking into account their mounting specifics and thickness. Methods for optimizing mirror design are presented, along with a comparative analysis of the strength and dynamic characteristics of mirrors with different configurations. Based on this analysis, principles for selecting the specific shape and material of scanning mirrors are formulated, balancing mass-dimensional and strength properties. A mathematical model for the laser scanning system is introduced, supporting automatic focusing based on mirror angles. The model incorporates: equations for axial beam path length in two-mirror systems, correlations between back focal distance and moving component position, a calculation algorithm for lens positioning in galvanometer-based dynamic assemblies. The article also presents the results of studying certain characteristics of a scanning system manufactured in accordance with the principles outlined in this paper.

acknowledgements The authors thank the management and employees of LLC “Rosatom Additive Technologies” for opportunity to test the device and collaboration.

references

1. Galantucci LM, Guerra MG, Dassisti M, et al. Additive Manufacturing: New Trends in the 4th Industrial Revolution. ***Proceedings of the 4th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing. AMP 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering.*** Cham: Springer; 2019: 153–169. DOI:10.1007/978-3-030-18180-2_12.
2. Jemghili R, Ait Taleb A, Mansouri K. Additive Manufacturing Progress as a New Industrial Revolution. ***Proceedeengs of the 2020 IEEE 2nd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS).*** Kenitra: IEEE; 2020: 1–8. DOI:10.1109/ICECOCS50124.2020.9314623.
3. Frolova AB, Shigapov AI. Istoriya, tekushcheye sostoyaniye i perspektivy razvitiya additivnykh tekhnologiy [History, Current Status and Development Projects of Additive Technologies]. ***Scientific News.*** 2022;29: 198–201. (In Russian).
4. Finogeev DYu, Reshetnikova OP. Additivnyye tekhnologii v sovremennom proizvodstve detaley tochnogo mashinostroyeniya [Additive Technologies in Modern Production of Precision Machine Building Parts]. ***Vestnik Saratov State Technical University.*** 2020;3(86): 63–71. (In Russian).
5. Yap CY, Chua CK, Dong ZL, et al. Review of Selective Laser Melting: Materials and Applications. ***Applied Physics Reviews.*** 2015;2: 2–18. DOI:10.1063/1.4935926.
6. Yang PM, Lo YL, Chang YH. Laser Galvanometric Scanning System for Improved Average Power Uniformity and Larger Scanning Area. ***Applied Optics.*** 2016;55(19): 5001–5007. DOI:10.1364/AO.55.005001.
7. Luo X, Li J, Lucas M. Galvanometer Scanning Technology for Laser Additive Manufacturing. ***Proceedings of SPIE. Laser 3D Manufacturing IV.*** San Francisco: SPIE; 2017(10095): 1–8. DOI:10.1117/12.2252973.
8. Alekseeva EM, Borshevnikov AN, Gribova GO, et al. Razrabotka gibridnoy skaniruyushchey sistemy dlya ustanovok selektivnogo lazernogo plavleniya [Development of a Hybrid Scanning System for Selective Laser Melting Installations]. ***Pribory.*** 2023;6(276): 26–34. (In Russian).
9. Godineau K, Lavernhe S, Tournier C. Calibration of Galvanometric Scan Heads for Additive Manufacturing with Machine Assembly Defects Consideration. ***Additive Manufacturing.*** 2019;26: 250–257. DOI:10.1016/j.addma.2019.02.003.
10. Xiaoling S, Bin Z, Weihao X, et al. The Design of Laser Scanning Galvanometer System. ***Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering.*** San Francisco: SPIE; 2015;9449: 2–9. DOI:10.1117/12.2082774.
11. Gilyazov MR, Nagulin KYu, Gilmutdinov AKh. Dinamicheskiye kharakteristiki galvanometricheskogo skanatora dlya lazernoy poverkhnostnoy obrabotki [Dynamic Characteristics of Galvanometric Scanner for Laser Surface Treatment]. ***Trudy MAI.*** 2018;101: 23. (In Russian).
12. Gridin VM. Elektromagnitnyye kharakteristiki momentnykh beskontaktnykh dvigateley postoyannogo toka [Electromagnetic Characteristics of Torque Contactless DC Motors]. ***Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering.*** 2011;2(83): 75–86. (In Russian).
13. Ho CC, Liang YS. Research and Development of High-Speed Laser Scanning Galvanometer System. ***Smart Science.*** 2013. Vol. 1. Iss. 2. P. 82–85. DOI:10.6493/SmartSci.2013.153.
14. Metelkova J, Kinds Y, Kempen K, et al. On the Influence of Laser Defocusing in Selective Laser Melting of 316L. ***Additive Manufacturing.*** 2018;23: 161–169. DOI:10.1016/j.addma.2018.08.006.
15. Putzer M, Zweifel M, Kneubuhler F, et al. Self-Optimizing Method and Software for Calibration and Mapping of a Laser System for Laser Machining. ***Optics and Lasers in Engineering.*** 2024;178: 108245. DOI:10.1016/j.optlaseng.2024.108245.
16. Stubenvoll M, Mann K. Measurement and Compensation of Laser-Induced Wavefront Deformations and Focal Shifts in Near IR Optics. ***Optics Express.*** 2014;22(21): 25385–25396. DOI:10.1364/OE.22.025385.
17. Yeung H, Lane B, Donmez M, et al. In-Situ Calibration of Laser/Galvo Scanning System Using Dimensional Reference Artefacts. ***CIRP Annals.*** 2020;69(1): 441–444. DOI:10.1016/j.cirp.2020.03.016.

authors

Ilya S. Sharapov
LUCH Research and Production Association, Research and Development Institute, Joint Stock Company (LUCH JSC), Podolsk, Russia
0009-0005-7449-6517

Gleb E. Verba
glebverba@mail.ru
LUCH Research and Production Association, Research and Development Institute, Joint Stock Company (LUCH JSC), Podolsk, Russia

Submitted: May 08, 2026. Accepted: June 23, 2026. Published: June 30, 2026.

УДК 681.7.012
DOI:10.30533/GiA-2026-032

CC BY

Архитектура и функциональная модель работы бортового комплекса оптической навигации и посадки космического летательного аппарата на поверхность малых тел Солнечной системы

А.А. Лобанов[1]

[1] МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия
aa.lobanoff@ya.ru

цитирование Лобанов А.А. Архитектура и функциональная модель работы бортового комплекса оптической навигации и посадки космического летательного аппарата на поверхность малых тел Солнечной системы // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 3. С. 151–163. DOI:10.30533/GiA-2026-032.

ключевые слова модель архитектуры, нотация C4, нотация BPMN, флеш-лидар, корреляционный оптический пеленгатор, оптическое наведение

аннотация Цель настоящей статьи заключается в разработке архитектуры и функциональной модели комплекса оптической навигации и наведения при посадке космического летательного аппарата на малые тела Солнечной системы. Для достижения поставленной цели был выполнен анализ известных миссий к малым телам Солнечной системы и перспективных оптико-электронных приборов. На основе анализа определен оптимальный набор оптико-электронных приборов в составе комплекса оптической навигации и наведения космического летательного аппарата в процессе посадки на малые тела Солнечной системы. Предлагаемый набор позволяет обеспечить навигацию, наведение и автономный выбор безопасной точки посадки в различных условиях освещения. В результате была создана искомая модель архитектуры в нотации C4, которая описывает взаимодействие оптико-электронных приборов и систем в составе комплекса наведения и посадки космического летательного аппарата. Модель архитектуры была дополнена функциональной моделью взаимодействия систем в составе комплекса навигации и наведения в нотации BPMN. Были выявлены особенности использования нотации BPMN для моделирования процессов комплекса навигации и наведения. Представленные научные результаты могут быть использованы для реализации будущих исследований Солнечной системы и повышения уровня технологической готовности отечественной космической отрасли.

1 Введение

Актуальность создания для автоматических космических летательных аппаратов (КЛА) бортовых систем навигации и посадки на поверхность малых тел Солнечной системы (МТСС) связана с необходимостью изучения последних. Переход от дистанционных способов изучения к научным исследованиям на поверхности МТСС является вопросом времени и финансирования. Ведущие космические агентства уже осуществили или планируют миссии с посадкой на поверхность малых тел. Активно разрабатываются системы и алгоритмы наведения на точку предполагаемого касания МТСС [1–4]. Большинство перспективных с точки зрения изучения малых тел находится на значительном удалении от Земли, что исключает ручное или автоматизированное управление КЛА с Земли. В таких случаях возможна только автоматическая посадка. Кроме того, к подобным системам предъявляются весьма жесткие ограничения и требования. В их числе — малая масса и габариты, высокая радиационная стойкость, вибрационная защищенность, низкое энергопотребление, малая требовательность к вычислительным ресурсам и др.

Для создания эффективного, устойчивого к сбоям и отказам комплекса, способного обеспечить выполнение посадки на поверхность МТСС с высокой точностью при различных условиях освещения, необходимо создать архитектуру, предусматривающую взаимодействие различных оптико-электронных приборов (ОЭП), бортовых систем и команд с Земли как единого целого. Такой комплекс должен при помощи оптических средств определять положение КЛА и осуществлять контроль за его движением относительно исследуемого тела, в том числе в процессе посадки на поверхность МТСС. Критически важными при этом становятся разработка и внедрение новых подходов к сбору и обработке оптической информации с минимальным уровнем требований к объему вычислительных ресурсов и памяти бортового оборудования и способности комплекса эффективно работать в различных условиях освещения поверхности малого тела.

Исследования малых тел имеют важное теоретическое и прикладное значение, включая поиск полезных ископаемых и разработку технологий астероидной защиты Земли [5, 6]. Следует заметить, что осуществление мягкой посадки на поверхность малых тел — сложная научная проблема.

Научная новизна предлагаемой работы заключается в развитии технологий автономной навигации с использованием ОЭП. Предложенные архитектура и функциональная модель являются основой для создания универсальных оптико-электронных комплексов посадки КЛА, способных работать в различных условиях освещения и малой гравитации.

2 Материалы и методы

В статье выполнен анализ миссий к малым телам Солнечной системы с целью систематизации сведений о бортовых оптических и оптико-электронных приборах и комплексах, используемых для наведения и посадки КЛА на МТСС.

Методом экспертной оценки среди современных ОЭП были отобраны наиболее перспективные. Их целесообразно использовать в составе НиНКА (Навигации и Наведения Комплекс Автономный).

После отбора приборов была разработана модель архитектуры бортового комплекса навигации и наведения. Для проектирования архитектуры использована современная нотация C4. В этой нотации разработана контекстная модель (*англ.* system landscape), которая отражает действующие системы и подсистемы комплекса.

Для детального описания процессов взаимодействия оборудования и наземной группы миссии была создана стратиграмма (*лат.* stratum — «слой, пласт», *греч.* gramma — «черта, написание») — таблица последовательности работы

бортового оборудования в процессе сближения с МТСС и посадки КЛА. Стратиграмма визуализирована с помощью диаграммы BPMN, которая детально описывает функциональное взаимодействие элементов в составе комплекса, предложенного в модели C4.

2.1 Анализ миссий по исследованию малых тел

За последние десятилетия было запланировано и реализовано несколько миссий, направленных на исследование МТСС. Настоящий анализ направлен на определение успешных подходов и основных технологических проблем.

Мягкая посадка была предусмотрена изначально в двух миссиях[1]: Rosetta / Philae (Европейское космическое агентство — *англ.* European Space Agency, ESA) и «Фобос-Грунт» (Роскосмос).

В рамках миссии Rosetta / Philae спускаемый аппарат Philae впервые осуществил посадку на ядро кометы. Отсутствие приборов навигации и наведения, а также средств управления посадкой на аппарате Philae привело к неконтролируемому отскоку, опрокидыванию аппарата и затенению солнечных батарей. Отсутствие зарядки батарей сильно сократило срок работы аппарата на поверхности кометы. Не все запланированные эксперименты были выполнены [7, 8].

Основной задачей миссии «Фобос-Грунт» был сбор и доставка на Землю образцов реголита с поверхности спутника Марса Фобос [1]. Конструкция аппарата предполагала наличие следующих специальных приборов управления сближением и посадкой:

— широко- и узкоугольных телевизионных камер (ШТК и УТК);
— высотомера-вертиканта;
— доплеровского измерителя скорости и дистанции.

Более подробно проанализируем алгоритм использования оптических приборов для навигации и наведения КЛА. В Институте космических исследований (ИКИ РАН) был разработан алгоритм поиска безопасного места посадки по анализу контраста изображений, получаемых во время спуска и посадки КЛА сначала от ШТК, а затем от УТК [4].

Высотомер-вертикант предполагал измерение расстояния в четырех направлениях. Измерения выполняются одним лучом вдоль главной оси КЛА и тремя лучами равноотклоненно от этой оси с разворотом на 120° относительно друг друга. Это теоретически позволяет определить угол между главной осью КЛА и нормалью к поверхности в точке посадки. Однако авария на переходной орбите не позволила использовать эти приборы и оценить их эффективность.

Миссии Hayabusa 1 и Hayabusa 2 Японского агентства аэрокосмических исследований (*англ.* Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) оснащались высокоточным оборудованием оптического наведения, которое позволило осуществить успешный сбор материала с поверхности астероидов. В то же время технически была реализована только операция зависания вблизи поверхности астероидов (без полноценной посадки в общепринятом смысле) [9].

Аппарат NEAR Shoemaker (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства — *англ.* National Aeronautics and Space Administration, NASA) осуществил успешную посадку на астероид Эрос[2], хотя эта задача не входила в первоначальный план миссии. Посадка аппарата NEAR осуществлялась по алгоритму, заранее загруженному в бортовой комплекс с Земли (из центра управления полетами — ЦУП). Камеры в процессе посадки использовались лишь для фиксации процедуры посадки и особенностей поверхности астероида [10–16]. Успешная посадка в данном случае обусловлена несколькими причинами, главными из которых можно назвать длительное детальное изучение объекта посадки (аппарат изучал Эрос почти год: с 14 февраля 2000 года

1 Учитываются миссии к малым телам Солнечной системы.

2 Fulchignoni M., Dunham D.W., Farquhar R.W., et al. Implementation of the First Asteroid Landing // Icarus. 2002. Vol. 159. Iss. 2. P. 433–438.

до 12 февраля 2001 года)[3], относительно безопасный рельеф в районе посадки, а также ряд других факторов, одновременное сочетание которых в произвольных условиях маловероятно.

Миссия DART (NASA) [10, 12] продемонстрировала успешное использование системы оптической навигации для наведения на центр астероида, столкновения с ним аппарата с целью изменения орбиты астероида. Миссия успешно использовала камеру DRACO (*англ.* Didymos Reconnaissance and Asteroid Camera for Optical Navigation — «камера Didymos для оптической навигации вблизи астероида») совместно со специально разработанной системой SMART Nav (*англ.* Small-body Maneuvering Autonomous Real Time Navigation — «автономная навигация в режиме реального времени для сближения с малым телом»)[4,5].

Результаты анализа миссий представлены в табл. 1.

Таблица 1
Краткий анализ миссий по исследованию МТСС

Table 1
Brief analysis of small Solar System bodies exploration missions

Миссия (агентство)	Тип системы наведения	Тип предполагаемой посадки	Оценка результатов	Примечание
Rosetta / Philae (ESA)	Отсутствует	Мягкая	Частично	Изучение ядра кометы
Фобос-Грунт (Роскосмос)	Оптическая	Мягкая	—	Посадка не осуществлена (авария на переходной орбите)
Hayabusa 1 (JAXA)	Оптическая	Зависание	Успех	Сбор образцов *без посадки на поверхность*
Hayabusa 2 (JAXA)	Оптическая	Зависание	Успех	Сбор образцов *без посадки на поверхность*
NEAR (NASA)	Детерминированный алгоритм	Мягкая	Успех	Получены детальные изображения поверхности астероида
Dart (NASA)	Оптическая	Жесткая (удар)	Успех	Удар с целью изменения периода вращения астероида

В рамках одной статьи невозможно выполнить анализ всех миссий. Однако рассмотренные космические полеты являются репрезентативными, и можно сделать вывод, что оптические системы для наведения КЛА в процессе спуска и посадки на малые тела имеют важное значение для успеха всей миссии.

2.2 Перспективные оптико-электронные инструменты

Рассмотрим альтернативные средства оптической навигации. В настоящее время для навигации дронов получили большое распространение следующие оптико-электронные приборы: стереокамеры, камеры структурированного света, твердотельные лидары (*англ.* solid-state LiDAR) и флеш-лидары (*англ.* flash LiDAR), или времяпролетные (*англ.* Time-of-Flight) камеры.

Экспертная оценка оптико-электронных инструментов (табл. 2) проводилась по пятибалльной шкале, где 5 — наилучшие показатели данной характеристики, а 1 — наихудшие.

Оценка показывает, что времяпролетные камеры (флеш-лидары) — наиболее сбалансированные оптико-электронные приборы для управления посадкой на МТСС. По сути, флеш-лидар — это импульсный дальномер матричного типа, или цифровая камера — дальномер. Результат работы такой камеры — двумерный план расстояний до объектов в центральной проекции. Особо следует

3 Eros // National Aeronautics and Space Administration. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://science.nasa.gov/solar-system/asteroids/433-eros/ (дата обращения: 20.03.2026).

4 Double Asteroid Redirection Test (DART) // National Aeronautics and Space Administration. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://science.nasa.gov/planetary-defense-dart (дата обращения: 20.03.2026).

5 SMART Nav: Giving Spacecraft the Power to Guide Themselves // National Aeronautics and Space Administration. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.nasa.gov/solar-system/smart-nav-giving-spacecraft-the-power-to-guide-themselves/ (дата обращения: 13.03.2026).

отметить высокую скорость работы (до 300 кадров/сек). Малая дистанция работы (30–50 м) ограничивает применение времяпролетной камеры при посадке на объекты с сильной гравитацией, например Луну, где высота принятия решения о посадке составляет 450–500 м. Однако для МТСС, где высота принятия решения на порядок меньше, такой диапазон работы является достаточным. Твердотельные лидары и стереокамеры также обладают высокими показателями. Главным их преимуществом выступает дальность работы. Недостатком этих приборов является сложное программное обеспечение для обработки данных, а следовательно, высокая требовательность к бортовым вычислительным ресурсам и энергопотреблению.

Таблица 2
Сравнение возможностей оптико-электронных инструментов

Table 2
Comparison of optoelectronic instruments' capabilities

Критерий	Камера в режиме стереосъемки	Камера структурированного света	Твердотельный лидар	Флеш-лидар (времяпролетная камера)
Вычислительная сложность программного обеспечения	2	3	2	5
Стоимость оборудования	5	4	2	4
Масса и размер	4	2	5	5
Скорость работы	4	3	5	5
Точность измерения расстояний	3	1	5	4
Работа при слабом освещении	1	5	5	4
Работа при ярком освещении	5	1	5	4
Энергопотребление	5	4	1	5
Дальность действия	5	1	4	2
Оценка	**3,8/5**	**2,7/5**	**3,8/5**	**4,2/5**

2.3 Архитектура бортового комплекса наведения и посадки космического летательного аппарата

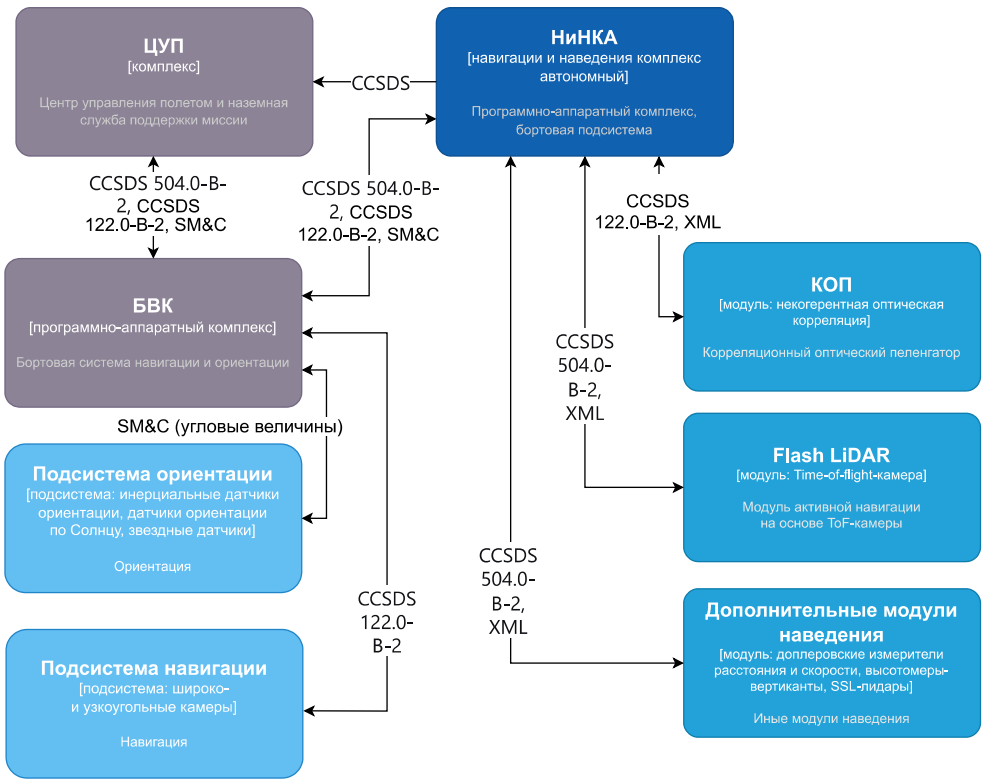
На основе анализа существующих миссий предлагается архитектура автономной оптической системы навигации и наведения КЛА (рис. 1). Анализ показал, что использование ОЭП является необходимым условием для посадки на МТСС с учетом оценки перспективных оптико-электронных приборов, которые целесообразно задействовать в комплексе наведения и навигации КЛА для посадки на малые тела.

На верхнем уровне расположен НиНКА (блок синего цвета). Для его работы нужны данные от бортовой системы навигации и ориентации, которая входит в состав бортового вычислительного комплекса [17] (включает звездные датчики и датчики ориентации по Солнцу, инерциальные датчики и гироскопы). ЦУП (наземная служба поддержки миссии) выполняет концептуальное управление, например сложную обработку данных, создание трехмерной модели малого тела, выбор региона посадки с учетом научных интересов, радиовидимости с Земли и т. п. Обе системы (блоки серого цвета) являются внешними для НиНКА и соответствуют второму уровню архитектуры. На третьем уровне модели находятся подсистемы БВК и модули НиНКА (блоки голубого цвета).

Корреляционный оптический пеленгатор необходим для работы пассивной оптико-электронной системы во внутренней Солнечной системе, где для этого достаточно освещения. Он значительно меньше нагружает бортовые вычислительные ресурсы КЛА, чем другие приборы оптической навигации. Однако во внешней Солнечной системе освещенность существенно ниже. По некоторым расчетам, уже в поясе Койпера освещенность поверхности небесных тел может быть 0,1 люкса и менее. В этом случае необходимо использовать

Рис. 1
Архитектура бортовой системы навигации и посадки КЛА

Fig. 1
Architecture of onboard navigation and landing systems of the spacecraft



активные ОЭП для навигации и наведения. В качестве такого прибора можно применять флеш-лидар (времяпролетную камеру) или твердотельный лидар. При работе НиНКА также могут быть задействованы другие инструменты, например доплеровские измерители дистанции и скорости, высотомеры-вертиканты и т. п., если необходимость их использования будет обоснованна. Применение этих инструментов позволяет решать специальные задачи и повышать отказоустойчивость комплекса.

В диаграмме C4 на рис. 1 указаны протоколы передачи данных в соответствии с документами Консультативного комитета по космическим системам передачи данных (*англ.* Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS), в частности CCSDS 122.0-B-2 описывает процедуру сжатия изображений, SM&C — процедуру управления КЛА. В контексте стандартов CCSDS XML используется как формат обмена данными, например для телеметрии и команд, т. к. он строго структурирован и его корректность можно проверить автоматически. Протокол CCSDS 504.0-B-2 “Attitude Data Messages” определяет два стандартных формата сообщений для обмена информацией о пространственной ориентации[6]. Архитектурная модель C4 является статической и показывает компоненты и связи между ними, необходимые для слаженной работы комплекса.

2.4 Стратиграмма автономной посадки

Для описания этапов работы комплекса предложена стратиграмма — таблица разделения на функциональные слои / страты процесса сближения и посадки (табл. 3). Каждая страта соответствует определенному расстоянию от КЛА до малого тела и определяет набор активных инструментов.

6 Consultative Committee for Space Data Systems. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ccsds.org (дата обращения: 20.03.2026).

Таблица 3
Стратиграмма работы оптического комплекса навигации и наведения

Table 3
Stratigram of the optical navigation and guidance complex operation

Страта	Дистанция до объекта, км	Алгоритм работы в пределах страты	Инструменты, используемые в рамках страты
1	300 000–100 000	Сближение с малым телом и переход от радионавигации к оптической навигации	Звездные и солнечные датчики / УТК
2	100 000–10 000	Использование камер. Уточнение формы, размеров, положения МТСС в системе координат J2000	Звездные и солнечные датчики / УТК / ШТК
3	10 000–1000	Съемка МТСС с высоким разрешением. Предварительный выбор региона (регионов) посадки. Определение параметров собственного возмущенного движения МТСС	Звездные и солнечные датчики / УТК / ШТК
4	1000	Окончательный выбор региона посадки. Разработка базового сценария посадки	ЦУП / команда миссии КЛА
5	1000–5	Начало процедуры посадки космического аппарата на МТСС. Работа НиНКА. Анализ региона посадки в автономном режиме	УТК / ШТК
6	5000–50	Использование корреляционного оптического пеленгатора для наведения в выбранную безопасную точку	УТК / ШТК / корреляционный оптический пеленгатор
7	50–0	Включение в работу НиНКА флеш-лидара для уточнения неровностей поверхности и уклонов предполагаемого места посадки	УТК / ШТК / флеш-лидар

2.5 Приборы в составе автономного комплекса навигации и наведения

Оптическая навигация осуществляется с момента, когда излучение от МТСС начинает регистрироваться приемниками излучения бортовых камер. Определим состав оптико-электронных приборов в составе НиНКА на основе ранее выполненного анализа и оценки. В состав комплекса должны входить:

- камеры для съемки изучаемого тела, которые могут работать как в оптическом (видимом), так и в ближнем инфракрасном диапазоне спектра (традиционно на аппаратах используют широко- и узкоугольные камеры; в процессе навигации при помощи камер уточняется положение МТСС КЛА в единой системе координат);
- корреляционный оптический пеленгатор, необходимый для навигации и наведения КЛА на этапе сближения и посадки (минимально нагружает вычислительные ресурсы КЛА, которые в этот момент могут быть использованы другими системами);
- флеш-лидар, главное назначение которого — выбор безопасной точки посадки на высотах менее 50 м, вплоть до касания поверхности МТСС (является ОЭП активного типа и может работать в условиях низкой освещенности).

Комбинация указанных ОЭП позволяет создать комплекс оптической навигации и наведения КЛА, инвариантный к условиям освещения.

2.6 Функциональное моделирование процессов комплекса оптической навигации и наведения

Архитектурная модель C4 и стратиграмма дополняют друг друга, но не дают полного представления о процессе взаимодействия систем в составе комплекса. Для этого традиционно используют нотации функционального моделирования. Наиболее широкое распространение в настоящее время получили диаграммы BPMN. Такая диаграмма необходима для понимания процессов взаимодействия элементов комплекса. Требуется также оценить удобство и полноту получаемой информации при применении данной нотации.

Используя рис. 1 и табл. 3, составим диаграмму BPMN, описывающую связи между системами комплекса в процессе сближения и посадки КЛА (рис. 2).

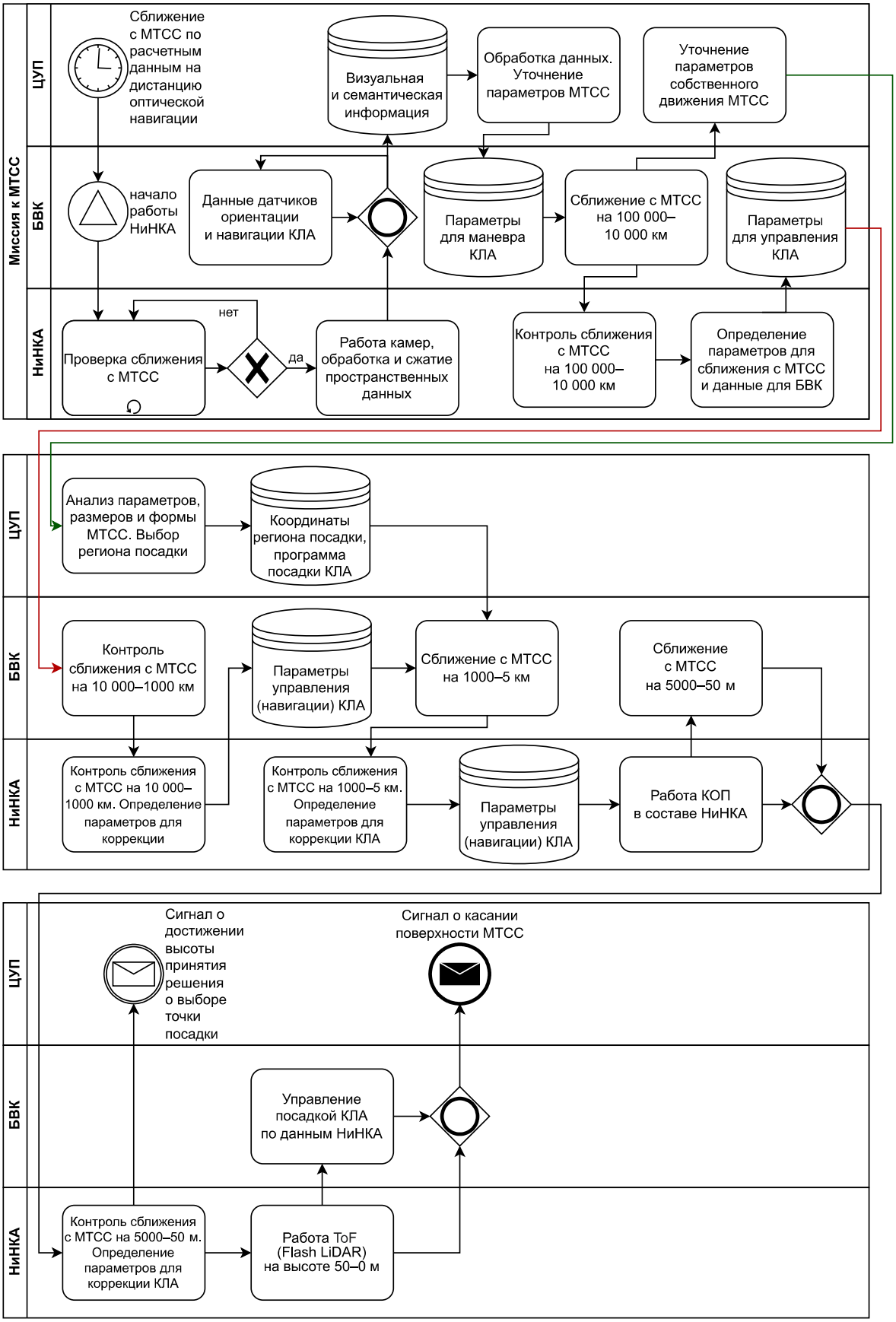


Рис. 2
Функциональная модель комплекса навигации и наведения в нотации BPMN

Fig. 2
Functional model of the navigation and guidance complex in BPMN notation

В отличие, например, от блок-схем (*англ.* workflow diagram), в нотации BPMN изначально присутствует разделение на дорожки. Дорожка в данном случае соответствует отдельной системе комплекса. В соответствии с моделью C4 используется три системы: НиНКА, ЦУП и БВК. Они отражены в соответствующих дорожках. Таким образом, BPMN позволяет описывать основные функциональные связи с указанием системы, которая выполняет данную функцию.

При описании функциональной модели выявлены некоторые особенности, которые могут ограничивать применение нотации.

1. *Сложность описания циклических процессов*. Описание циклов имеет ограниченный набор выразительных средств, что значительно увеличивает размеры диаграммы.
2. *Отсутствие иерархии и представление всех функций одним блоком.* Это приводит к созданию протяженных диаграмм. В данном случае, чтобы сделать подписи читаемыми, пришлось разделить диаграмму на три части. Для улучшения читаемости при этом были использованы цветные стрелки, что является отступлением от классической нотации (такое отступление было допущено, потому что читаемость диаграмм имеет приоритетное значение).
3. *Отсутствие в нотации формальных инструментов для разделения на страты или этапы.* Можно использовать, например, пунктирные линии. При этом для улучшения восприятия желательно сделать линии прямыми. В этом случае придется изменить компоновку блоков внутри диаграммы, что приведет к увеличению и без того большой диаграммы.

Несмотря на описанные особенности, нотация BPMN может быть успешно использована для создания функциональной модели комплекса оптической навигации и наведения и описания процессов, выполняемых системами в его составе.

3 Результаты и обсуждение

В ходе исследования были получены следующие результаты:

- выполнен анализ миссий к МТСС с целью систематизации сведений о бортовых ОЭП и оборудовании для наведения и посадки КЛА на малые тела;
- по итогу анализа и экспертной оценки предложен набор наиболее перспективных ОЭП в составе комплекса навигации и наведения КЛА;
- построена контекстная модель архитектуры бортового комплекса навигации и наведения в нотации C4, которая включает в себя ранее выбранные приборы;
- представлен оригинальный подход к определению алгоритма работы бортового комплекса навигации и наведения в виде стратиграммы;
- построена стратиграмма процесса наведения и посадки с учетом модели архитектуры комплекса и возможностей ранее выбранного оборудования;
- создана функциональная модель процессов в нотации BPMN для визуализации процессов, определенных в стратиграмме и необходимых для функционирования архитектуры.

В ходе анализа было установлено, что миссия Rosetta / Philae без специализированных оптических систем была менее успешна, чем использующие оптическую навигацию (DART, Hayabusa 1, 2), которые достигли всех поставленных целей. Таким образом, разработка комплекса оптической навигации является ключевым направлением повышения эффективности будущих миссий с посадкой на МТСС.

В дальнейшей работе целесообразно рассмотреть возможности:

- использования не только расстояния до объекта, но и других параметров для выделения страт (этапов) работы бортовых ОЭП;
- применения диаграммы активности UML (*англ.* Unified Modeling Language — «унифицированный язык моделирования») и (или) ДРАКОН-схем

для визуализации процессов и создания функциональной модели комплекса оптического наведения и посадки КЛА;
- эксплуатации твердотельных лидаров как отдельно, так и совместно с флеш-лидарами в процессе определения безопасного места посадки КЛА.

4 Выводы

В ходе исследования был проведен анализ реализованных миссий и существующих технологий оптической навигации, разработаны архитектурная и функциональная модели комплекса оптической навигации и посадки космических аппаратов на МТСС. Наиболее перспективными инструментами признаны камеры, корреляционный оптический пеленгатор и флеш-лидары (времяпролетные камеры). Их сочетание позволяет создать комплекс автономной оптической навигации, обеспечивающий баланс между точностью и ресурсоемкостью.

Реализация предлагаемого подхода позволит повысить надежность управления посадкой космических аппаратов в автономном режиме и откроет новые перспективы для освоения космоса. Созданные технологии найдут применение в предстоящих экспедициях к астероидам, кометам и малым лунам планет.

библиография

1. Жуков Б.С., Жуков С.Б. Отработка алгоритма автономного выбора места посадки космического аппарата «Фобос-Грунт» по телевизионным изображениям // Техническое зрение в системах управления 2011: сборник трудов научно-технической конференции. М.: ИКИ РАН, 2012. С. 203–208.
2. Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Сметанин П.С. Стенд для отработки технологии автономной припланетной навигации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 3. С. 108–117. DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-3-108-117.
3. Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Сметанин П.С. и др. Отработка технологии автономной навигации космических аппаратов дальнего космоса на Международной космической станции // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 7. С. 41–49. DOI:10.21046/2070-7401-2020-17-7-41-49.
4. Жуков Б.С., Полянский И.В., Жуков С.Б. Автономная оптическая навигация на окололунных орбитах и при посадке на Луну с помощью сверхширокоугольной камеры // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 2. С. 24–35. DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-2-24-35.
5. Эйсмонт Н.А., Боярский М.Н., Ледков А.А. и др. О возможности наведения малых астероидов на опасные небесные объекты с использованием гравитационного маневра // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. 2013. Т. 47, № 4. С. 352. DOI:10.7868/S0320930X13040129.
6. Wang Y., Koryanov V.V., Toporkov A.G. Hazardous Asteroid Deflection Based on “Space Billiard” Mode: Mission Analysis and Trajectory Design // Astrodynamics. 2025. Vol. 9. Iss. 4. P. 465–479. DOI:10.1007/s42064-024-0221-9.
7. Barucci M.A., Fulchignoni M. Major Achievements of the Rosetta Mission in Connection with the Origin of the Solar System // Astronomy and Astrophysics Review. 2017. Vol. 25. P. 3. DOI:10.1007/s00159-017-0103-8.
8. Ulamec S., Biele J., Cozzoni B., et al. Rosetta Lander – Philae on Comet 67p/Churyumov-Gerasimenko // Proceedings of the International Astronautical Congress 2015 (IAC 2015). Space – The Gateway for Mankind’s Future. Jerusalem: Curran Associates, Inc., 2015. Vol. 2. P. 1209–1212.
9. Okada T., Righter K., Brunetto R., et al. Special Issue “New Insights in Planetary Science with Hayabusa, Hayabusa2, and Future Space Missions” // Earth, Planets and Space. 2025. Vol. 77. P. 84. DOI:10.1186/s40623-025-02210-z.
10. Knuuttila O., Kestilä A., Kallio E. CNN-Based Local Features for Navigation Near an Asteroid // IEEE Access. 2024. Vol. 12. P. 16652–16672. DOI:10.1109/access.2024.3358021.

11. French A.S., Mcmahon Ja.W. Independent Estimate of Asteroid 433 Eros' Spin State Using Surface Doppler from the NEAR-Shoemaker Mission // Icarus. 2020. Vol. 338. P. 113537. DOI:10.1016/j.icarus.2019.113537.
12. Sarli B.V., Ozimek M.T., Atchison J.A., et al. NASA Double Asteroid Redirection Test (DART) Trajectory Validation and Robustness // Advances in the Astronautical Sciences: 27th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting. San Antonio: AAS/AIAA, 2017. P. 3–20.
13. Mizuno T., Kase T., Shiina T., et al. Development of the Laser Altimeter (LIDAR) for Hayabusa 2 // Space Science Reviews. 2017. Vol. 208. P. 33–47. DOI:10.1007/s11214-015-0231-2.
14. Daly M.G., Barnouin O.S., Dickinson C., et al. The OSIRIS-REx Laser Altimeter (OLA) Investigation and Instrument // Space Science Reviews. 2017. Vol. 212. P. 899–924. DOI:10.1007/s11214-017-0375-3.
15. Leonard J.M., Moreau M.C., Antreasian P.G., et al. Cross-Calibration of GNC and OLA LIDAR Systems Onboard OSIRIS-Rex // Sandnas M., Spencer D.B. (eds). Proceedings of the 44th Annual American Astronautical Society Guidance, Navigation, and Control Conference, 2022. Cham: Springer, 2024. P. 1585–1607. DOI:10.1007/978-3-031-51928-4_88.
16. Sun X., Cremons D.R., Mazarico E., et al. Small All-Range Lidar for Asteroid and Comet Core Missions // Sensors. 2021. Vol. 21. Iss. 9. P. 3081. DOI:10.3390/s21093081.
17. Тарасов И.Е., Советов П.Н., Люлява Д.В. и др. Методика проектирования специализированных вычислительных систем на основе совместной оптимизации аппаратного и программного обеспечения // Russian Technological Journal. 2024. Т. 12, № 3. С. 37–45. DOI:10.32362/2500-316X-2024-12-3-37-45.

автор **Лобанов Александр Анатольевич**
ФГБОУ ВО «МИРЭА — Российский технологический университет», Москва, Россия
кафедра инструментального и прикладного программного обеспечения,
Институт информационных технологий
канд. техн. наук, доцент
0000-0003-2690-5660

Поступила 24.03.2026. Принята к публикации 23.06.2026. Опубликована 30.06.2026.

UDC 681.7
DOI:10.30533/GiA-2026-032

CC BY

Architecture and Functional Model of the Onboard Optical Navigation and Landing System for Spacecraft on Small Solar System Bodies

Aleksandr A. Lobanov[1]

[1] MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia
aa.lobanoff@ya.ru

citation Lobanov AA. Architecture and Functional Model of the Onboard Optical Navigation and Landing System for Spacecraft on Small Solar System Bodies. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2026;70(3): 151–163. DOI:10.30533/GiA-2026-032.

keywords architecture model, C4 notation, BPMN, flash LiDAR technology, correlation optical direction finder, optical guidance

abstract The purpose of this article is to develop the architecture and functional model of an optical navigation and guidance system for landing on small bodies of the Solar System. To achieve this goal, an analysis was conducted of known missions to small bodies of the Solar System and promising optoelectronic instruments. Based on this analysis, an optimal set of optoelectronic instruments was identified for the spacecraft's optical navigation and guidance complex during landing on small bodies of the Solar System. The proposed set enables navigation, guidance, and autonomous selection of a safe landing site for the spacecraft under various lighting conditions. As a result, the required architecture model was created using C4 notation, which describes the interactions among optoelectronic instruments and systems within the spacecraft's guidance and landing complex. The architecture model was supplemented with a functional model of system interactions in the navigation and guidance complex, represented in BPMN notation. Specific features of using BPMN notation for modeling navigation and guidance processes were identified. The presented scientific results can be utilized for future Solar System exploration missions and to enhance the technology readiness level of the domestic space industry.

references

1. Zhukov BS, Zhukov CB. Otrabotka algoritma avtonomnogo vybora mesta posadki kosmicheskogo apparata "Fobos-Grunt" po televizionnym izobrazheniyam [Testing of the Algorithm for Autonomous Landing Site Selection of the Phobos-Grunt Spacecraft]. *Computer Vision in Control Systems 2011: Proceedings of the Scientific-Technical Conference.* Moscow: IKI RAS; 2012: 203–208. (In Russian).

2. Avanesov GA, Zhukov BS, Smetanin PS. Stend dlja otrabotki tehnologii avtonomnoj priplanetnoj navigacii [Stand for Testing the Technology of Autonomous Near-Planet Navigation]. ***Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space.*** 2021;18(3): 108–117. (In Russian). DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-3-108-117.
3. Avanesov GA, Zhukov BS, Smetanin PS, et al. Otrabotka tekhnologii avtonomnoy navigatsii kosmicheskikh apparatov dal'nego kosmosa na Mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii [Testing the Technology of Deep Space Spacecraft Autonomous Navigation at the International Space Station]. ***Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space.*** 2020;17(7): 41–49. DOI:10.21046/2070-7401-2020-17-7-41-49.
4. Zhukov BS, Polyanskiy IV, Zhukov SB. Avtonomnaja opticheskaja navigacija na okololunnyh orbitah i pri posadke na Lunu s pomow'ju sverhshirokougol'noj kamery [Autonomous Optical Navigation at Lunar Orbits and During Landing on the Moon Using an Extra Wide Angle Camera]. ***Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space.*** 2017;14(2): 24–35. (In Russian). DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-2-24-35.
5. Eismont NA, Boyarsky MN, Ledkov AA, et al. On the Possibility of the Guidance of Small Asteroids to Dangerous Celestial Bodies Using the Gravity-Assist Maneuver. ***Solar System Research.*** 2013;47(4): 352. (In Russian). DOI:10.7868/S0320930X13040129.
6. Wang Y, Koryanov VV, Toporkov AG. Hazardous Asteroid Deflection Based on "Space Billiard" Mode: Mission Analysis and Trajectory Design. ***Astrodynamics.*** 2025;9(4): 465–479. DOI:10.1007/s42064-024-0221-9.
7. Barucci MA, Fulchignoni M. Major Achievements of the Rosetta Mission in Connection with the Origin of the Solar System. ***Astronomy and Astrophysics Review.*** 2017;25: 3. DOI:10.1007/s00159-017-0103-8.
8. Ulamec S, Biele J, Cozzoni B, et al. Rosetta Lander – Philae on Comet 67p/Churyumov-Gerasimenko. ***Proceedings of the International Astronautical Congress 2015 (IAC 2015). Space – The Gateway for Mankind's Future.*** Jerusalem: Curran Associates, Inc.; 2015(2): 1209–1212.
9. Okada T, Righter K, Brunetto R, et al. Special Issue "New Insights in Planetary Science with Hayabusa, Hayabusa2, and Future Space Missions". ***Earth, Planets and Space.*** 2025;77: 84. DOI:10.1186/s40623-025-02210-z.
10. Knuuttila O, Kestilä A, Kallio E. CNN-Based Local Features for Navigation Near an Asteroid. ***IEEE Access.*** 2024;12: 16652–16672. DOI:10.1109/access.2024.3358021.
11. French AS, Mcmahon JaW. Independent Estimate of Asteroid 433 Eros' Spin State Using Surface Doppler from the NEAR-Shoemaker Mission. ***Icarus.*** 2020;338: 113537. DOI:10.1016/j.icarus.2019.113537.
12. Sarli BV, Ozimek MT, Atchison JA, et al. NASA Double Asteroid Redirection Test (DART) Trajectory Validation and Robustness. ***Advances in the Astronautical Sciences: 27th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting.*** San Antonio: AAS/AIAA; 2017: 3–20.
13. Mizuno T, Kase T, Shiina T, et al. Development of the Laser Altimeter (LIDAR) for Hayabusa 2. ***Space Science Reviews.*** 2017;208: 33–47. DOI:10.1007/s11214-015-0231-2.
14. Daly MG, Barnouin OS, Dickinson C, et al. The OSIRIS-REx Laser Altimeter (OLA) Investigation and Instrument. ***Space Science Reviews.*** 2017;212: 899–924. DOI:10.1007/s11214-017-0375-3.
15. Leonard JM, Moreau MC, Antreasian PG, et al. Cross-Calibration of GNC and OLA LIDAR Systems Onboard OSIRIS-Rex. Sandnas M., Spencer D.B. (eds). ***Proceedings of the 44th Annual American Astronautical Society Guidance, Navigation, and Control Conference, 2022.*** Cham: Springer; 2024: 1585–1607. DOI:10.1007/978-3-031-51928-4_88.
16. Sun X, Cremons DR, Mazarico E, et al. Small All-Range Lidar for Asteroid and Comet Core Missions. ***Sensors.*** 2021;21(9): 3081. DOI:10.3390/s21093081.
17. Tarasov IE, Sovietov PN, Lulyava DV, et al. Method for Designing Specialized Computing Systems Based on Hardware and Software Co-Optimization. ***Russian Technological Journal***. 2024;12(3): 37–45. (In Russian). DOI:10.32362/2500-316X-2024-12-3-37-45.

author **Aleksandr A. Lobanov**
MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia
Department of Instrumental and Applied Software, Institute of Information Technologies
PhD in Engineering, Associate Professor
0000-0003-2690-5660

Submitted: March 24, 2026. Accepted: June 23, 2026. Published: June 30, 2026.

Международная научная онлайн-конференция

Пространственные данные: наука и технологии 2026

25–28 мая 2026 / Москва / МИИГАиК

173	11	12	4
доклада	секций	стран	дня

Научная программа

Научные руководители секций — Число докладов

01 **Фотоника. Оптико-электронные приборы и комплексы** — 14
И.П. Торшина (д-р техн. наук), В.А. Соломатин (д-р техн. наук), Д.А. Балабанова (канд. техн. наук)

02 **Геоинформатика: проблемы сбора, обработки, анализа и защиты пространственных и пространственно-временных данных** — 20
А.В. Матерухин (д-р техн. наук), О.Г. Гвоздев (канд. техн. наук), Н.Д. Лукьяненко

03 **Геоинформационное картографирование** — 21
О.Н. Николаева (д-р техн. наук), А.А. Иванова

04 **Аэрокосмические съемки. Фотограмметрия** — 15
А.Г. Чибуничев (д-р техн. наук), Т.Н. Скрыпицына (канд. техн. наук), А.В. Говоров (канд. техн. наук)

05 **Мониторинг земель, природных ресурсов и чрезвычайных ситуаций** — 19
В.В. Беленко (д-р техн. наук)

06 **Актуальные вопросы государственного кадастра недвижимости, землеустройства и управления территориями** — 27
Т.В. Илюшина (д-р геогр. наук), А.М. Тарарин (канд. техн. наук), А.А. Воронцова

07 **Инженерная и космическая геодезия** — 28
А.О. Куприянов (канд. техн. наук), В.И. Крылов (канд. техн. наук), Д.Е. Леве

08 **Геодезия. Системы геодезического обеспечения** — 11
В.В. Ознамец (д-р техн. наук), И.М. Кравчук (канд. техн. наук)

09 **Геоэкология** — 7
В.В. Братков (д-р геогр. наук), Н.В. Фомина (канд. геогр. наук)

10 **Международная (доклады на английском языке)** — 6
А.В. Белоцерковский (д-р физ.-мат. наук), И.И. Астахова

11 **Пространственные данные: единство и многообразие** — 5
К.О. Хачатрян

География участников

Россия · Беларусь · Узбекистан · Вьетнам · Казахстан · Киргизия
Монголия · Куба · Китай · Албания · Кот-д'Ивуар · Сирия

25–28 мая 2026 года в Московском государственном университете геодезии и картографии прошла ежегодная Международная научная онлайн-конференция **«Пространственные данные: наука и технологии»**, призванная объединить усилия ученых и практиков, которые используют в своей работе геоданные. С докладами выступили представители крупнейших российских университетов, государственных структур и корпораций, а также предприятий реального сектора экономики. Географический охват участников был традиционно широким (Россия, Беларусь, Узбекистан, Вьетнам, Казахстан, Киргизия, Монголия, Куба, Китай, Албания, Кот-д'Ивуар, Сирия), что обеспечило международный обмен опытом и результатами исследований в области сбора и обработки пространственных данных.

Работа конференции велась по одиннадцати секциям, на которых было представлено 173 доклада. Это позволило охватить все направления современного знания о пространственных данных — от фундаментальной оптики и геодезии до экологии.

На секции **«Фотоника. Оптико-электронные приборы и комплексы»** обсуждались проблемы применения оптических систем для мониторинга околоземного космического пространства, освещалось состояние спутниковой лазерной дальнометрии в части лазерных передатчиков, рассматривалось использование голографии для создания визуальных маркеров и индикаторов со специальными свойствами и др.

В значительной части докладов, представленных на секции **«Геоинформатика: проблемы сбора, обработки, анализа и защиты пространственных и пространственно-временных данных»**, были предложены решения актуальных проблем транспортной системы (сбор и обработка пространственных данных для оценки транспортной доступности предприятий лесопромышленного комплекса, информационное обеспечение навигационной системы для малого водного транспорта на внутренних водных путях России, оптимизация маршрутов транспортных групп в условиях бездорожья), рассматривались различные способы использования искусственного интеллекта при работе с геоданными (применение машинного обучения для выделения морских судов на снимках, интеграция искусственного интеллекта в производственные процессы для автоматизации картографических работ).

Вопросы **геоинформационного картографирования** на конференции были раскрыты в выступлениях, посвященных применению нейросетевых методов компьютерного зрения в задачах картографии, информационному обеспечению геотехнического мониторинга, анализу картографических веб-сервисов геолого-геофизической изученности и т. д.

В рамках секции **«Аэрокосмические съемки. Фотограмметрия»** рассматривались особенности обработки данных лазерного сканирования для оценки светового режима леса, инвентаризации городских насаждений, при анализе снежного покрова; предлагалось решение задач дистанционного зондирования Земли с помощью структурозонального способа получения видеоинформации, посредством использования текстурных признаков Харалика и др.

Участники секции **«Мониторинг земель, природных ресурсов и чрезвычайных ситуаций»** обсуждали такие проблемы, как использование радиолокационной интерферометрии для отслеживания деформаций поверхности вдоль линейных объектов, анализ спектральных индексов для мониторинга земель нефтегазовых районов Крайнего Севера, дистанционные методы исследования карстовых провалов и др.

Актуальные вопросы **государственного кадастра недвижимости, землеустройства и управления территориями** на конференции были представлены выступлениями о конфликте законодательства и землеустроительной науки при образовании земельного участка и формировании землепользования, о влиянии сквозных технологий на трансформацию подходов в градостроительной деятельности, об устойчивом развитии территорий в контексте уровней российской публичной власти. Особое внимание привлекли доклады специалистов, рассказавших о развитии инфраструктуры пространственных данных и системы кадастровой оценки в Беларуси.

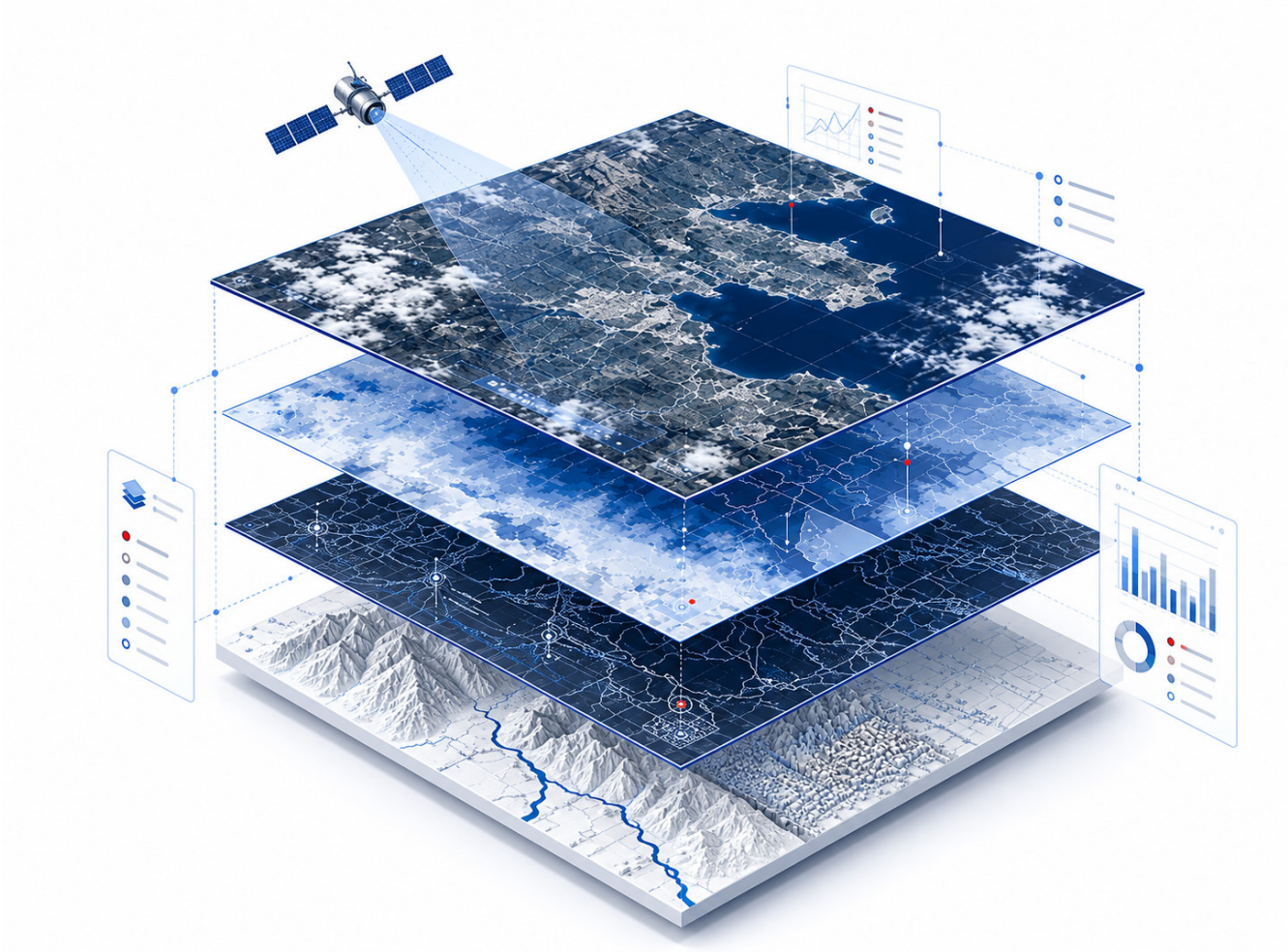
Традиционно много выступлений было заслушано в рамках секции **«Инженерная и космическая геодезия»**. Здесь обсуждались как высокоточные методы разбивочных работ, мониторинг деформаций, геодезическое обеспечение информационного моделирования, так и развитие государственных геодезических сетей, методы спутниковых наблюдений, параметры вращения и гравитационное поле Земли, фундаментальные проблемы геодинамики.

Доклады на секции **«Геодезия. Системы геодезического обеспечения»** были посвящены, в частности, новым возможностям виртуальной референцной станции, использованию отечественных цифровых гидронивелиров «Монитрон» для непрерывного контроля вертикальных смещений, наблюдениям за деформационными процессами в тоннеле метро посредством новой ультразвуковой системы, сравнительному анализу структуры подразделений геодезического сопровождения строительства в разных странах и т. д.

Проблемы **геоэкологии**, поднятые на конференции, касались применения данных дистанционного

зондирования Земли для геоэкологической оценки природно-территориальных комплексов агломераций, для изучения аридности ландшафтов в пределах государственного природного биосферного заповедника «Черные Земли» (Республика Калмыкия), для исследования палеорельефа как фактора современной геоэкологической обстановки урбанизированной территории на примере Краснодара и др.

В международной секции были представлены доклады на английском языке, охватывающие самые разные темы: от применения машинного обучения для прогноза планетарного К-индекса или для классификации рисовых полей и полей сахарного тростника на основе спутниковых снимков до раннего удаления динамических объектов с фотограмметрических изображений для трехмерного моделирования городской инфраструктуры.

Секция **«Пространственные данные: единство и многообразие»** стала площадкой для коммуникации разных специалистов, работающих с пространственными данными. Здесь обсуждались особенности решения прикладных задач (например, шрифтовое оформление карт-схем городского транспорта, интеграция разнородных пространственных данных для устойчивого пространственного развития территорий), а также была предложена концепция единого информационного пространства подготовки документации по планировке территории при взаимодействии на федеральном и региональном уровнях.

Широкий круг участников и обсужденных на секциях проблем показывает, что конференция «Пространственные данные: наука и технологии» является значимым событием не только для фундаментальной науки, но и для системы государственного управления и реального сектора экономики.